

**Статистические характеристики изменчивости течений, ветровых волн Черного и  
уровня Азовского морей. Характеристика межгодовой и внутригодовой  
изменчивости термохалинных полей, полей течений, уровня и ветрового волнения.  
Обзор фоновых и экстремальных режимных характеристик для Черного и Азовского  
морей за последние 40 лет**

(А.В. Григорьев, И.М. Кабатченко, Ю.Г. Филиппов)

Статистические характеристики изменчивости динамики вод Черного моря по данным  
численного моделирования

(А.В. Григорьев)

Традиционные технологии построения карт распределения основных гидрофизических параметров опирались на анализ фактического материала (данных экспедиционных наблюдений), математическую обработку исходных данных и построение карт распределений характеристик с заданным пространственным разрешением. Современная технология создания климатических атласов отличается от таковых прошлых лет в первую очередь качественным переходом от анализа данных натуральных наблюдений (включая расчеты течений динамическим методом на основе данных наблюдений над температурой и соленостью) к модельным расчетам полей течений на основе численных моделей с усвоением данных наблюдений.

Согласно [Белокопытов, 2004], сезонный цикл геострофической циркуляции, рассчитанной по климатическим термохалинным полям за период 1950 – 2000 гг., можно представить в виде следующей временной последовательности (рис. 1):

- а) январь – март: единое циклоническое вращение с центром в восточной части моря, западный круговорот выражен слабо;
- б) апрель – май: единое циклоническое вращение с центром в западной части моря, восточный круговорот выражен слабо;
- в) июнь – июль: два круговорота, западный более интенсивен;
- г) август – сентябрь: два круговорота, восточный более интенсивен;
- д) октябрь – декабрь: два круговорота равной интенсивности.

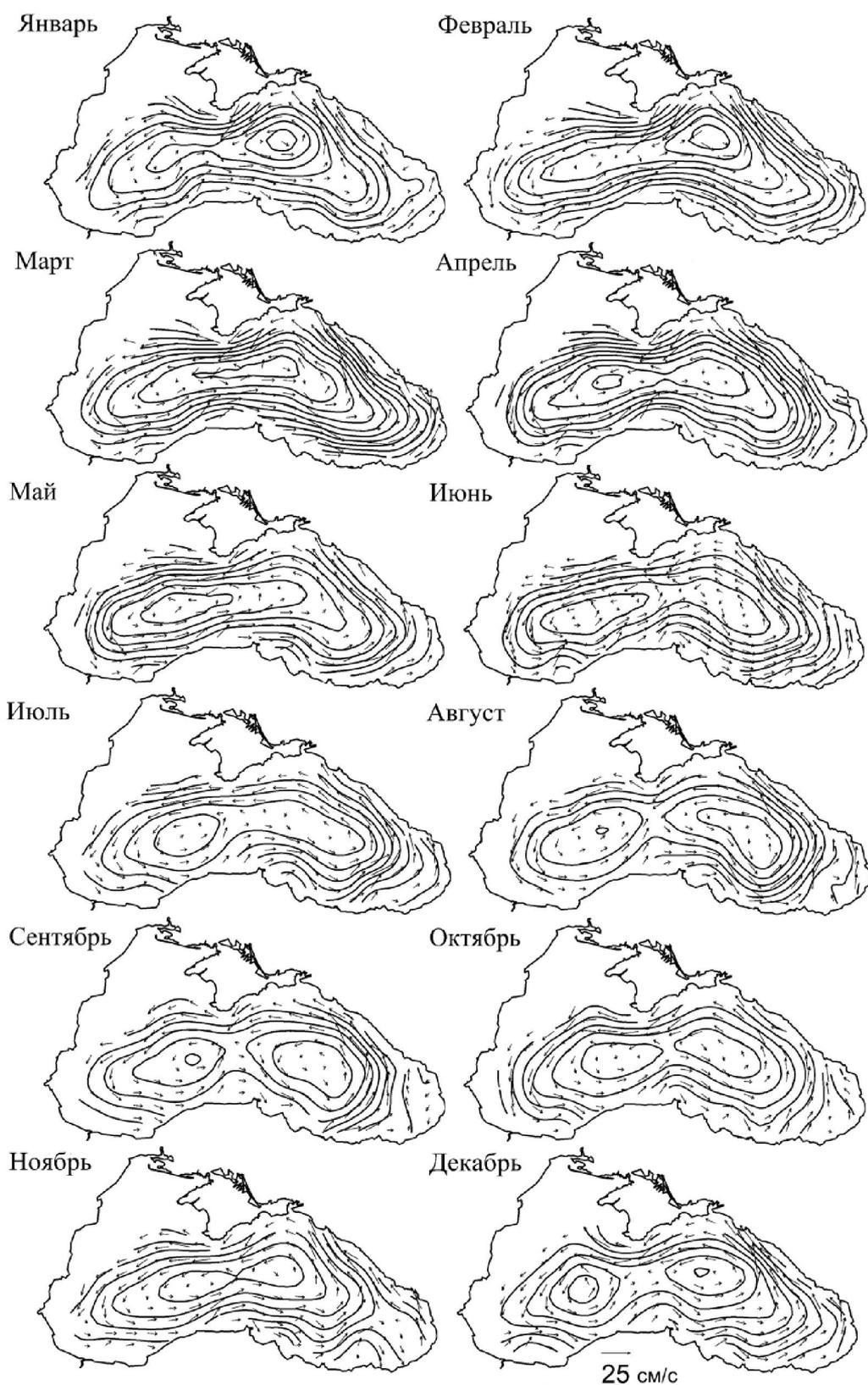


Рис. 1. Среднемесячные поля динамической топографии поверхности Черного моря относительно 300 дб, рассчитанные динамическим методом по климатическим полям плотности (изолинии проведены через 2 дин. см)

Одной из важных, и возможно, главных причин такой сезонной изменчивости циркуляции является то, что в системе море-атмосфера в холодный период года море играет роль локального источника нагрева атмосферы, создавая локализованную над ним барическую депрессию и связанную с ней ячейку циклонической циркуляции. В свою очередь, создаваемые под влиянием моря особенности атмосферной циркуляции определяют либо оказывают воздействие на формирование соответствующей ей системы течений в море ([Григорьев, Петренко, 1999]. Т.е. сезонный ход интенсивности интегральной по бассейну циркуляции может быть обусловлена сезонным ходом завихренности ветра над морем. Причем зимняя интенсификация связывается с максимумом завихренности ветра, вызванного муссонным эффектом [Коротаев, 2001; Ефимов и др., 2002] (рис. 2).



Рис. 2. График временной изменчивости кинетической энергии поверхностных течений (общечерноморская модель МГИ) и ветра (модель SKIRON, Греция) за период 2010-2012 гг. Модельные данные, средние значения по региону.

На рисунке 3 приведены примеры результаты расчетов климатического поля течений (среднегодовые) на поверхности моря (а, средние за 1971-1981 гг.), выполненные на основе крупномасштабных моделей РОМ (шаг по горизонтали  $\sim 7.5$  км) и МГИ (шаг по горизонтали  $\sim 5$  км), а также соответствующие им «розы» течений в характерных точках сеточной области (рис. 4). Как видно из рисунков, при такой пространственной дискретности моделирования в климате РОМ выделяется только ОЧТ и Батумский антициклон. В модели МГИ, с меньшим горизонтальным разрешением, в летний сезон система вихрей выражена с заметно большим разнообразием. Причем в области свала глубин течения в статистическом плане направлены строго вдоль склона. В глубоководной же области моря, при в целом циклонической направленности течений, разброс по направлению более разнообразен. То есть можно говорить о довольно высоком соответствии данных крупномасштабного моделирования течений и «традиционного» (основанного на анализе натуральных данных) представления о динамике вод моря.

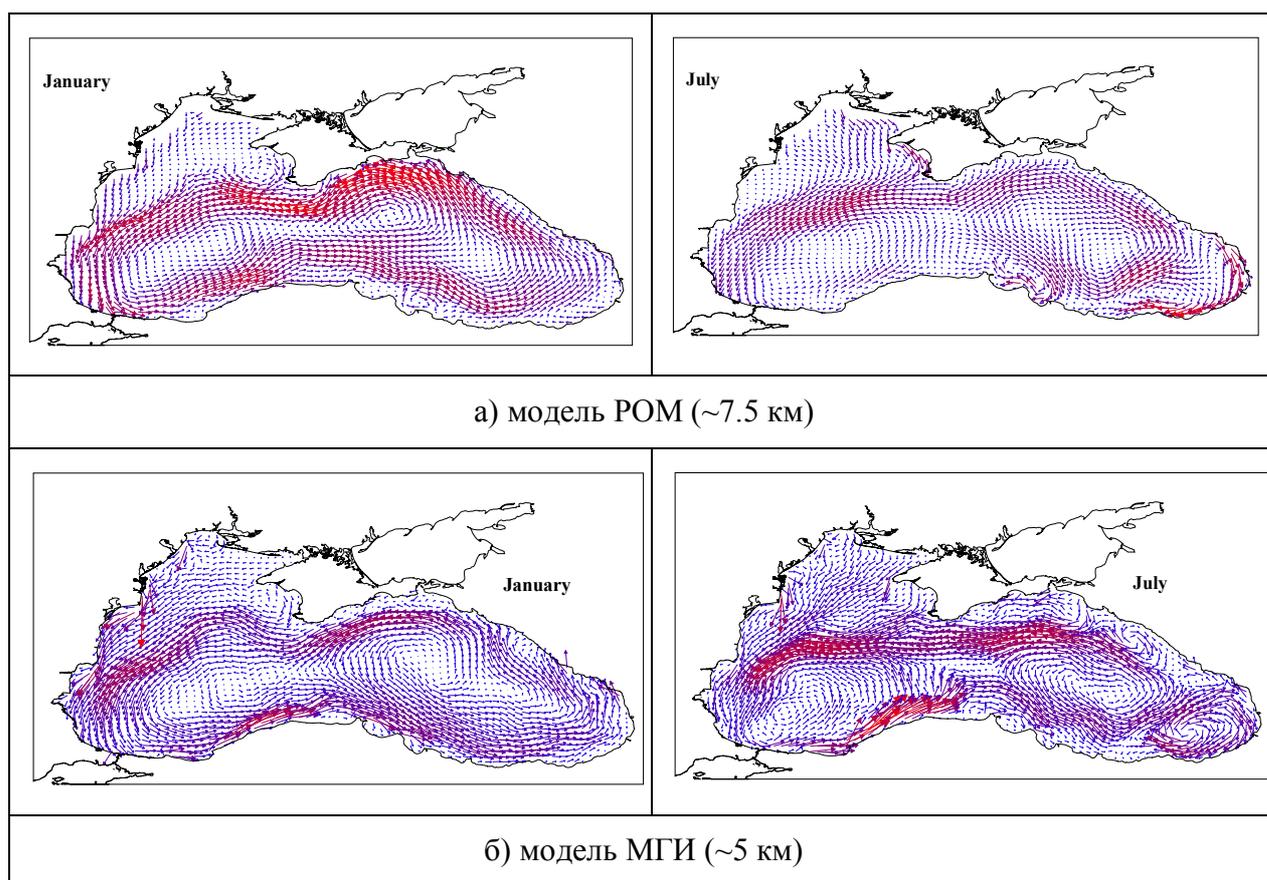


Рис. 3. Климатические поля течений на поверхности Черного моря (общекбассейновые модели РОМ, а, и МГИ, б).

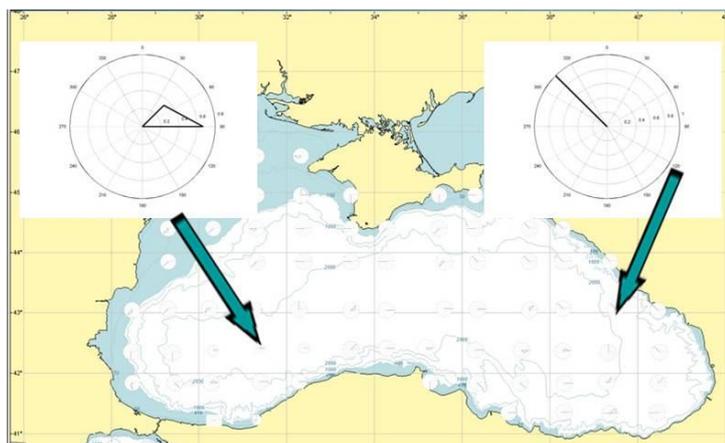
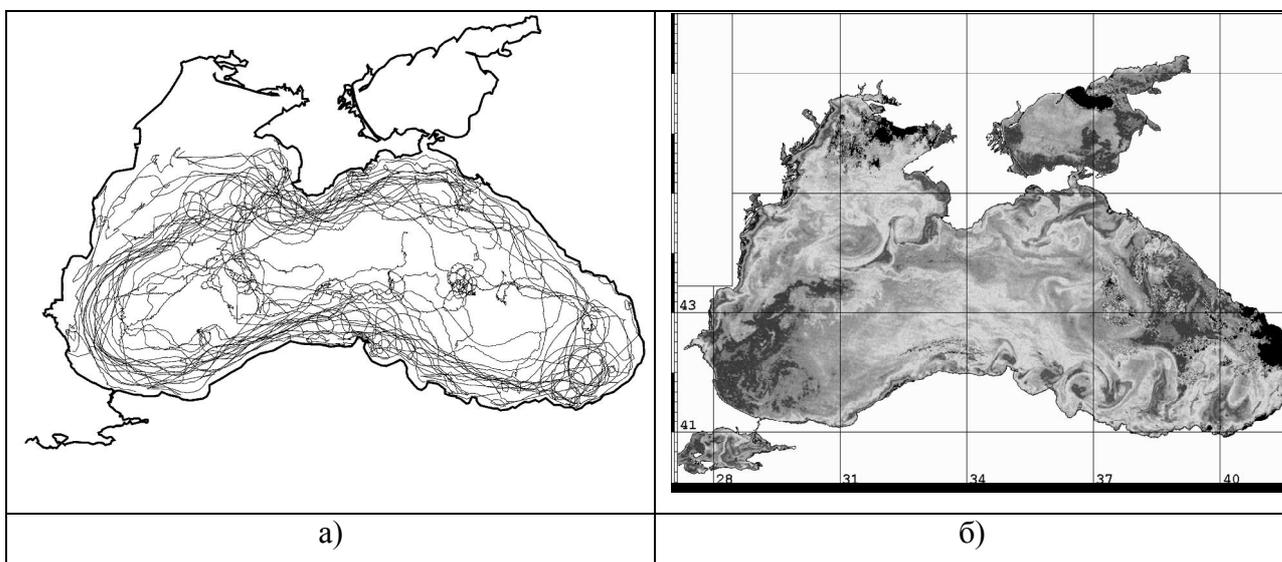


Рис. 4. «Розы» поверхностных течений в различных областях моря (общесейсмическая модель РОМ).

Однако в последнее время появилось немало работ, основанных главным образом на данных дрейферных и спутниковых наблюдений, где сформулирована точка зрения, что ОЧТ не является в общем случае ни стационарным, ни непрерывным и «ободковым» (перевод принятого в англоязычной литературе термина “Rim current”) течением. В частности, из всех запущенных дрейферов (рис. 5 а) только 9 совершили один или более вокруг всего моря, подтвердив наличие общей циклонической циркуляции вод ([Журбас с соавт., 2003] и ссылки в ней). На спутниковых изображениях (рис. 5 б, в) ОЧТ как единый поток также не проявляется. В отличие от системы вихрей различного размера и знака ([Зацепин с соавт., 2011] и ссылки в ней).



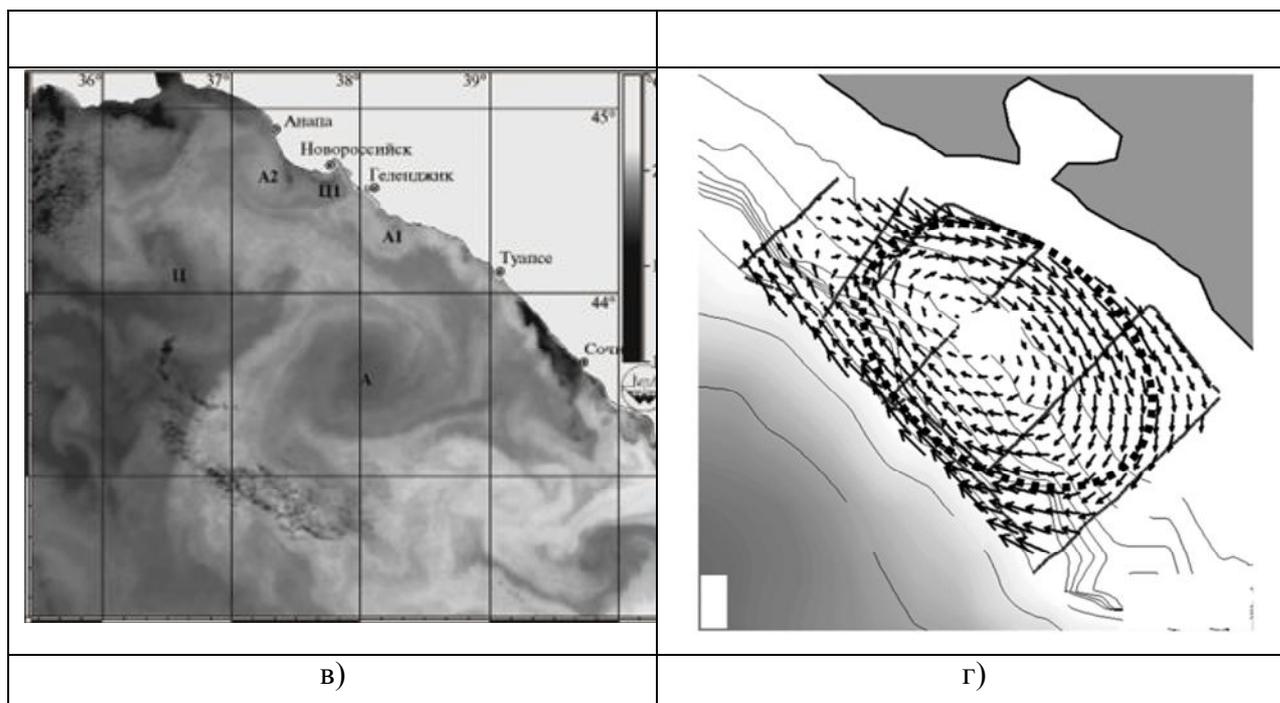


Рис. 5. а) траектории лагранжевых дрейфтеров в Черном море, запущенных в 1999-2002 гг.; б,в) спутниковые изображения Черного моря и его северо-восточной области; г) векторы скоростей течений по данным измерений ADCP на полигоне в районе Геленджика.

Рассмотрим результаты моделирования течений в северо-восточной области Черном море на основе региональной модели POM с горизонтальным разрешением  $\sim 1$  км [Григорьев, 2015]. На рис. 6 приведена «роза» течений в характерной точке сеточной области (в сравнении с аналогичной, полученной по крупномасштабной модели). Данные расчетов по региональной модели свидетельствуют о значительно более высокой степени изменчивости течений по направлению. Наряду с течениями преимущественно вдольбереговой направленности, свой вклад вносят и периодически возникающие мезомасштабные вихревые структуры (рис. 7, а). В то же время в климатических полях, полученных по региональной модели (средние за 20010-2014 гг.), вихревые структуры не выделяются. Это свидетельствует о том, что в данном районе вихреобразование не носит орографический характер, обусловленный локальным расширением шельфовой зоны.

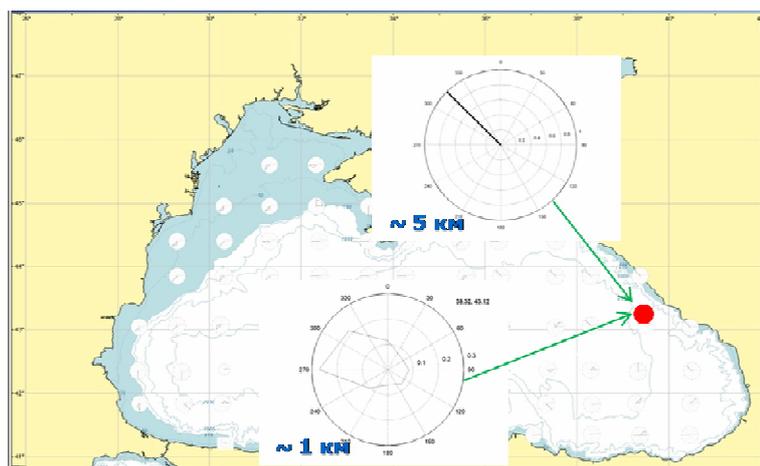


Рис. 6. «Розы» поверхностных течений, полученные в выбранной точке на основе расчетов по моделям с разрешением  $\sim 7.5$  км (общесейсмическая) и  $\sim 1$  км (региональная).

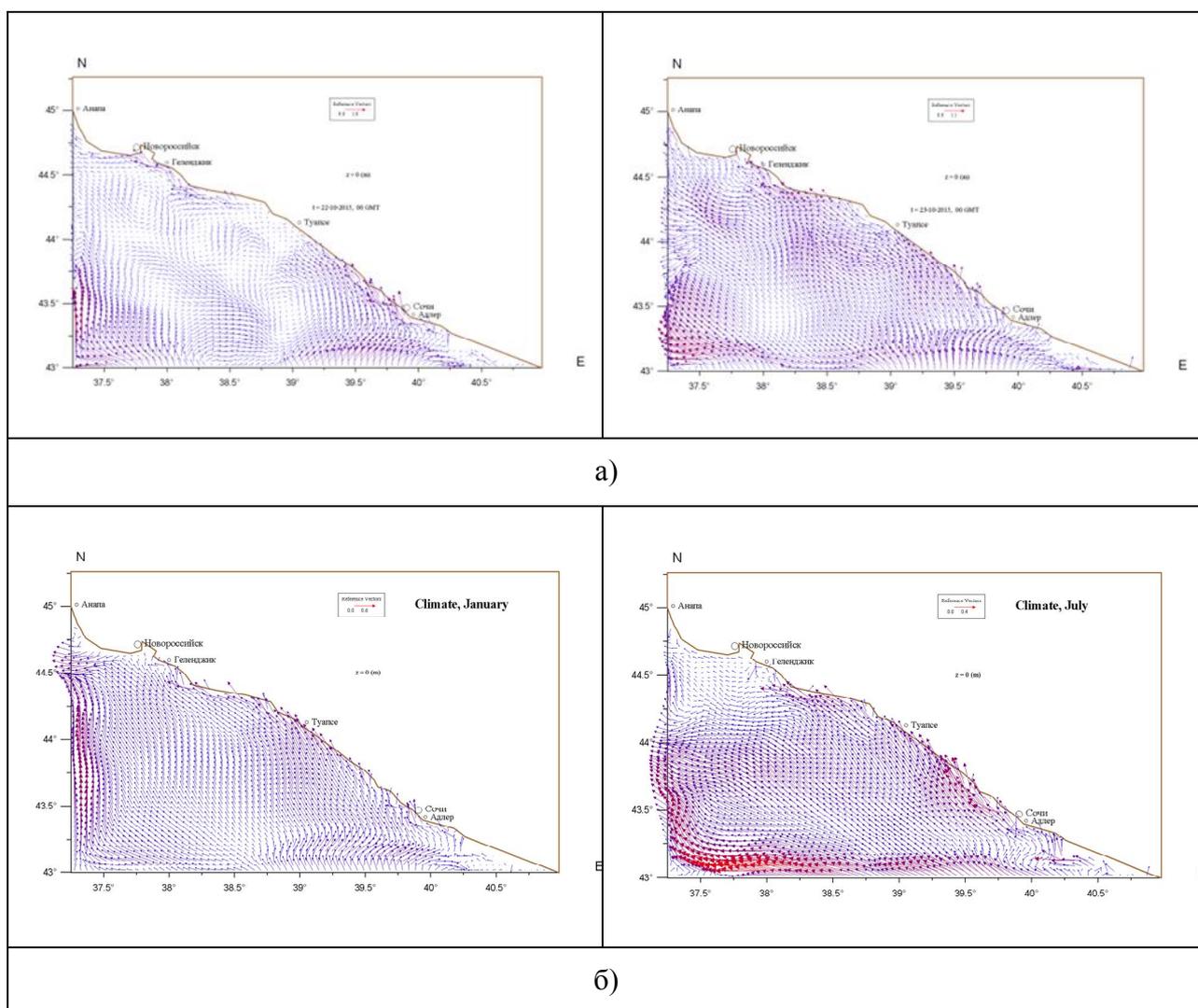


Рис. 7. Примеры текущих (а) и климатических (б) полей скоростей течений в северо-восточной области Черного моря (поверхность), рассчитанные на основе региональной модели с разрешением  $\sim 1$  км.

На рисунке 8 приведены спектры изменчивости солености на прибрежной ГМС «Сочи» за период 1991-2005 гг., и на ближайшей к Сочи и Туапсе точках сеточной области (региональная модель) за 2009 г. Как видно из рисунков, на всех из них ярко выражена синоптическая составляющая. Но если в спектре натуральных данных ярко выделяются два равнозначных пика – на периодах 2-3 суток и ~10 суток, то в спектрах, построенных по данным моделирования, пик для периода 2-3 суток выражен значительно слабее, максимум же энергии сосредоточен на частотах, соответствующих периоду ~5 суток. Такое различие в локальных максимумах спектров может быть вызвано следующими причинами. Согласно [Зацепин с соавт., 2011], непосредственно у берега существуют в том числе субмезомасштабные вихри с горизонтальными размерами 2-7 км и временем жизни 1-3 суток. Их влияние на термохалинную структуру вод и находит свое отражение в спектрах данных, получаемых на береговых ГМС. Модель с шагом по горизонтали ~1 км не может достаточно хорошо «разрешать» такие вихри в сеточной области.

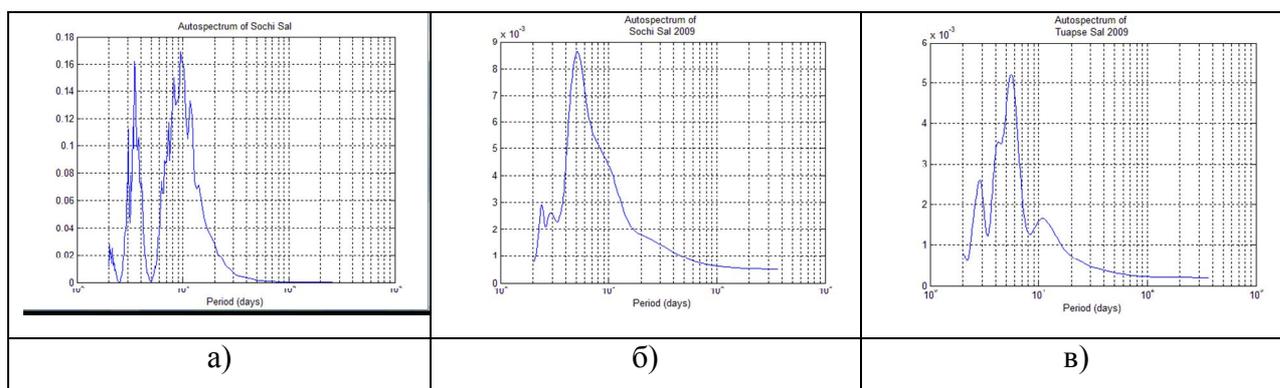


Рис. 8. Оценки автоспектров изменчивости солености в п. Сочи (а,б) и Туапсе (в), построенные по натуральным (а) и модельным (региональным) данным (б,в).

В целом результаты расчетов по региональной модели подтверждают, что о существовании т.н. Основного Черноморского течения (ОЧТ) как едином постоянно существующем потоке стоит говорить скорее в статистическом смысле. Основную роль в динамике вод моря следует отдать синоптической составляющей, проявляющейся в виде постоянно возникающих и эволюционирующих вихрей различного знака. Их интенсивность имеет хорошо выраженную сезонную изменчивость, причем таких сезонов можно выделить два – «зимний» и «летний». По-видимому, их главное различие обусловлено тем фактом, что в «зимний» сезон Черное море может рассматриваться как

своеобразный региональный «точечный» источник нагрева атмосферы со стороны поверхности моря, провоцирующий формирование барической ложбины в регионе и общую циклоническую циркуляцию атмосферы над морем. Как следствие – интенсификацию течений с периодически формируемым общим потоком. В «летний» же сезон система циркуляции в море представляет собой систему вихрей различного знака. Временные границы указанных сезонов могут быть приблизительно выбраны из анализа разности температур воды и воздуха, интегральных характеристик атмосферных процессов и полей течений. Они могут также изменяться от года к году.

Исходные данные, модели и методы, использованные при составлении режимно-справочного пособия по волнению Черного и Азовского морей

(И.М. Кабатченко )

*Метод расчета*

При составлении пособия используются результаты расчетов, полученные с помощью модельного комплекса ГОИНа, включающего в себя расчет атмосферного воздействия по модели WRF (Weather Research and Forecasting model) (Skamarock, 2008), и расчет ветроволновых характеристик по Российской атмосферноволновой модели (РАВМ) (Кабатченко и др., 2001). Целью настоящей работы является расчет режимных ветроволновых характеристик за ретроспективный период с 1979 по 2014 гг. в Черном и Азовском морях на основе этого комплекса. Для ускорения работы атмосферный форсинг рассчитывался не по модели WRF, а брался из базы данных Морского гидрофизического института (МГИ) (г. Севастополь), полученной с помощью модели атмосферной циркуляции RegCM версии 4.3.5.6 (Elguindi, et. al., 2013). Данные получены в рамках межинститутского обмена.

В настоящее время широко применяются методы расчета элементов волн, основанные на выводах спектральной теории морского волнения, разработанной Клаусом Хассельманном. Для спектральной плотности волнового действия  $n(\omega, \theta)$ , где  $n(\omega, \theta) = S(\omega, \theta) / \omega$  ( $S(\omega, \theta)$  – энергетический спектр ветрового волнения), может быть записано следующее уравнение [17,18]:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\omega, \theta) + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_{\lambda} n(\omega, \theta) + \frac{\partial}{\partial \varphi} c_{\varphi} n(\omega, \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} n(\omega, \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{ref} n(\omega, \theta) = P(\omega, \theta, U) \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая частота,  $\theta$  - направление распространения волнения,  $U$  - скорость ветра,  $\phi(\omega, \theta)$  - угловое распределение энергии,  $\varphi$  - широта,  $\lambda$  - долгота (сферические

координаты-углы),  $c_{\varphi} = c_g \frac{\sin \theta}{R}$ ,  $c_{\lambda} = c_g \frac{\cos \theta}{R \cos \varphi}$ ,  $c_{\theta} = -c_g \frac{\text{tg} \varphi \cos \theta}{R}$ ,

$c_g = \frac{1}{2} c \left( 1 + \frac{2kD}{sh(2kD)} \right)$  - групповая скорость,  $c = \left[ \frac{g}{k} th(kD) \right]^{1/2}$  - фазовая скорость волн,

$c_{ref} = \frac{\omega \left( \frac{\partial D}{\partial \lambda} \frac{\sin \theta}{\cos \varphi} - \frac{\partial D}{\partial \varphi} \cos \theta \right)}{sh(2kD)R}$ ,  $R$  - радиус земли. В левой части уравнения (1):  $c_{\lambda}$  - составляющая групповой скорости волнения в меридиональном направлении,  $c_{\varphi}$  - составляющая в широтном направлении,  $c_{\theta}$  - скорость отклонения волнового луча от

поллюсов к экватору, вызванная сферичностью Земли,  $\sigma\theta$  – скорость поворота волнового луча вследствие рефракции,  $P$  - функция источников и стоков, включающая функцию взаимодействия волн и ветра ( $P^+$ ), нелинейные взаимодействия в спектре ветровых волн ( $P_0$ ) и диссипацию ( $P^-$ ).

Основную трудность при решении уравнения (1) представляет учет члена нелинейных взаимодействий ( $P_0$ ), который в общем случае оказывается исключительно громоздким. Современные спектральные модели отличаются друг от друга способом упрощения данного члена. При составлении настоящего Режимно-справочное пособие а использовано «узконаправленное» приближение, разработанное академиком РАН В.Е. Захаровым. В рамках этой теории от двухмерного спектра  $n(\omega, \theta)$  переходят к двум интегральным функциям – спектру волновых чисел  $\bar{n}(k_x)$  и параметру узконаправленности  $\Delta(k_x)$ [6].

$$n(\mathbf{k}) = n(\omega, \theta) / (k d\omega(k) / dk) \quad (2)$$

$$\bar{n}(k_x) = \int n(\mathbf{k}) dk_y \quad (3)$$

$$\Delta(k_x) = \int k_y^2 n(\mathbf{k}) dk_y / \bar{n}(k_x) k_x^2, \quad (4)$$

где  $k_y$  - координата в пространстве волновых чисел перпендикулярная  $k_x$ , а направление  $k_x$  совпадает с генеральным направлением волнения. В этом случае функция источников и стоков может быть записана следующим образом [19]

$$P_n = a_1 \frac{\partial^2}{\partial k_x^2} [\ln(\Delta^{-1}(k_x)) \Delta(k_x) k_x^{19/2} \bar{n}^3(k_x)] + \bar{P}_n^+ - \bar{P}_n^- \quad (5a)$$

$$P_\Delta = \frac{-\Delta(k_x) P_n(\bar{n}(k_x)) + a_2 \bar{n}^3(k_x) k_x^{15/2} \Delta(k_x) \ln[\Delta^{-1}(k_x)] + \bar{P}_\Delta^+ - \bar{P}_\Delta^-}{\bar{n}(k_x)} \quad (5b)$$

где  $P_n$  и  $P_\Delta$  - функции источников и стоков для  $\bar{n}(k_x)$  и  $\Delta(k_x)$  соответственно,

$$\bar{P}_n^+(k_x) = \int P^+(\mathbf{k}) dk_y, \quad \bar{P}_n^-(k_x) = \int P^-(\mathbf{k}) dk_y, \quad \bar{P}_\Delta^+(k_x) = \int k_y^2 P^+(\mathbf{k}) dk_y, \quad \bar{P}_\Delta^-(k_x) = \int k_y^2 P^-(\mathbf{k}) dk_y.$$

На Центральной Методической Комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета метод расчета волнения в Северной Атлантике на базе «узконаправленной» модели был рекомендована в практику оперативных работ (решение от 17.10.01). На научно-техническом совете Росгидромета 6 июля 2001 года «узконаправленной» модели был придан статус Российской Атмосферно-Волновой Модели

На основании моментов  $\left( m_i = \int_0^{\infty} S(\omega) \omega^i d\omega \right)$  частотного спектра могут быть рассчитаны основные параметры ветрового волнения: средняя высота и средний период. Для средней высоты имеем:

$$\bar{h} = \sqrt{2\pi m_0}, \quad (6)$$

где  $m_0$  – нулевой момент частотного спектра. Средний период  $\bar{\tau}$  определяется через моменты частотного спектра как интервал времени между пересечениями при опускании уровня средней линии реализации:

$$\bar{\tau} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}. \quad (7)$$

Исходные поля ветра имеют разрешением (25×25 км.). Модель волнения имела тоже разрешения по пространству, результаты выдавались каждые 6 часов. Всего было получено более 50000 полей ветрового волнения за разные сроки.

Анализ режимных (климатических) характеристик ветрового волнения ведется для каждой точки сеточной области отдельно. Для оценки режимных характеристик рассчитывались эмпирические функции обеспеченности волновых параметров по всем срочным данным. Они в свою очередь были аппроксимированы теоретическим распределением Вейбулла, которое для средних высот волн имеет вид:

$$F(\bar{h}) = \exp \left[ - \ln 2 \left( \frac{\bar{h}}{\bar{h}_{50\%}} \right)^\gamma \right], \quad (8)$$

$\bar{h}_{50\%}$  – медианное климатическое значение средней высоты волны,  $\gamma$  - параметр распределения. Для построения кривых распределения высот и периодов волн были использованы графики с било-гарифмическим и логарифмическим масштабами декартовых осей координат. На таких графиках кривые распределения периодов и высот волн ветрового волнения представляются прямыми линиями. Для получения лучшего согласия эмпирического с теоретическим распределением был использован метод наименьших квадратов.

В качестве основной вероятностной характеристики волнения в Режимно-справочном пособии употребляется понятие обеспеченности.

Обеспеченность — это выраженная в процентах суммарная повторяемость всех случаев, когда высота или период волн превышают те или иные их значения. Термин «обеспеченность» соответствует понятию «вероятность превышения», употребляемому в

зарубежной практике океанографических исследований и в теории вероятностей. Результаты расчетов приведены в приложении.

#### *О результатах проверки надежности метода расчета*

Для условий Черного моря «узконаправленная» модель верифицировалась по данным измерений, выполненных с помощью заякоренного волноизмерительного буя «Directional Waverider Buoy» в районе Голубой бухты вблизи Геленджика специалистами Южного отделения ИОРАН. Координаты точки установки: 44°30'40 N, 37°58'70 E, глубина места – 85 м, что для всех наблюдавшихся волн соответствует условиям глубокой воды.

Расчеты выполнялись для серии штормовых ситуаций, продолжавшейся с 4 по 14 апреля 1997 года. Во время проведения эксперимента над Черным морем наблюдалась двухцентровая циклоническая система с центрами над Крымом и над Турцией, глубина циклонов - 1000 мб и менее. На западе поле атмосферного давления определялось отрогом Азорского антициклона. Результаты сравнения приведены на рис. 4. Поля ветра над Черным морем за 4-14 апреля 1997 года были рассчитаны по полям давления, снятых с кольцевых карт погоды Управления Военной Гидрографии Черноморского Флота.

Результаты сравнения следует признать удачными. Коэффициент разброса (SI) характеризует степень расхождение между рассчитываемыми и наблюдаемыми значениями высоты волны в конкретных точках. Чем он меньше, тем расчеты достовернее. SI в данном случае составляет менее 0,1, а коэффициент корреляции равен приблизительно 0,9, что считается весьма хорошим значением для волновых моделей в расчетном варианте.

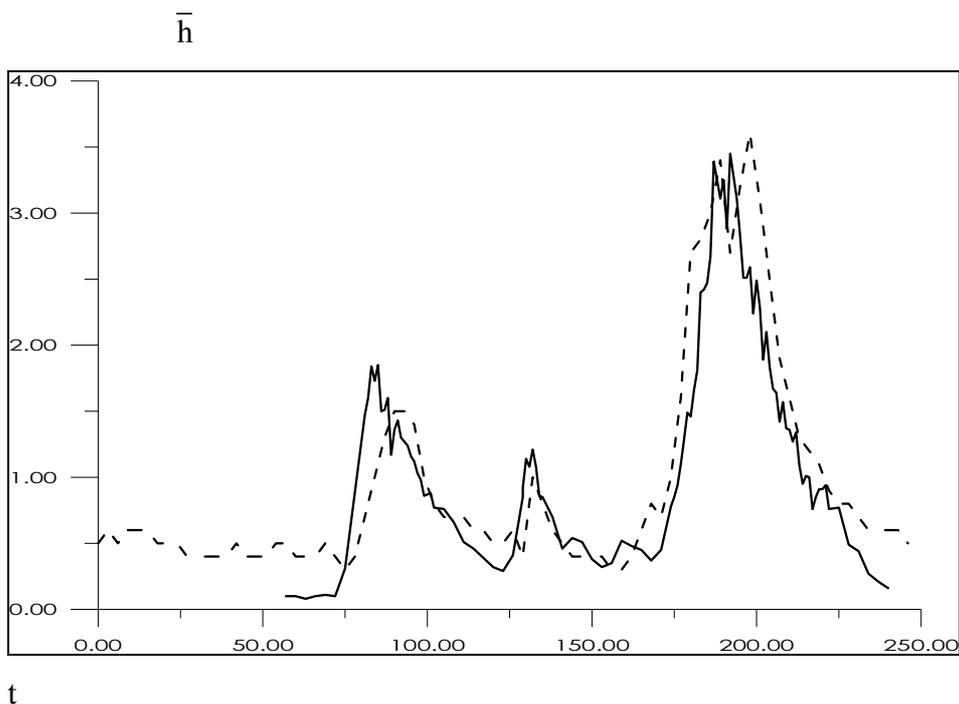


Рис. 1. Ход рассчитанных (пунктирная линия) и измеренных (сплошная линия) средних высот волн ( $\bar{h}$ , м) во время (t, часы) шторма 04.04.97-14.04.97 в районе Геленджика на Черном море, t=0 соответствует 03 часам 04.04.97.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 1

Атлас волнения и ветра Черного моря. – Л., Гидрометеиздат, 1969, 111 с.

Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. - Л. Транспорт, 1974, 359 с.

Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, Черное море, т. 4, Гидрометеиздат, Л., 1986.

Глуховский Б.Х. Исследование морского ветрового волнения. - Л. Гидрометеиздат, 1966.

Заславский М.М., Красицкий В.П. Связь наблюдаемых и слаботурбулентных пространственных спектров поверхностных гравитационных волн. – Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения. СПб. Гидрометеиздат, 1995, с.155-182.

Захаров В.Е., Смилга А. О квазиоднородных спектрах слабой турбулентности. - Журн. эксп. и теор. физ., 1981, т.81, вып.4(10), с.318-326.

Кабатченко И.М. Исследование режима штормовых ветров и волн на примере Черного моря. - Автореферат диссертации на соискание уч.ст. канд.геогр. наук. М. 1985. 18 с.

- Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море. - *Метеорология и гидрология*, 2001, N 5, с. 61-71.
- Матушевский Г.В., Трубкин И.П. Исследование и расчет орбитальных скоростей нерегулярного трехмерного волнения. – *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1981, т. 17, № 8 с. 834-843.
- Раскин Л.Г. Кабатченко И.М. Ветровое волнение. - *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*, том 4, Черное море, выпуск 1. Л., Гидрометеиздат, 1991, с. 354-367.
- Ржеплинский Г.В., Назаретский Л.Н. Расчет режима волнения шельфовых акваторий на примере Черного моря. – *Метеорология и гидрология*, 1974, № 1, с. 63-68.
- СНИП 2.06.04.-82 . Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). - М. Стройиздат, 1986.
- Типовые поля ветра и волнения Черного моря. – Под ред. Э.Н.Альтмана и Г.В.Матушевского. Севастополь, СОГОИН, 1987, 116 с.
- Boukhanovsky A.V., Divinsky B.V., Kos'yan R.D., Lopatoukhin L.I. Short-term wave statistics by the measurements of the buoy near the Russian coast of the Black Sea.- *Proc. of the MEDCOAST Conference on Wind and Wave Climate of Mediterranean and Black Sea, Antalya, Turkey. 1999. P. 231-239.*
- Boukhanovsky A.V., Divinsky B.V., Kos'yan R.D., Lopatoukhin L.I. Some results of wave measurement from the buoy near Gelendzhik. - *The Eighth Workshop of NATO TU-WAVES/Black Sea, METU, Ankara, Turkey. 1998. P. 7-8.*
- Kos'yan R. D., Divinsky B.V., Pushkarev O.V. Measurements of Parameters of Wave Processes in the Open Sea near Gelendzhik. - *The Eight Workshop of NATO TU-Waves/Black Sea. April 17-18. METU, Ankara, Turkey. 1998.*
- Ris R.S. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering. Report N 97-4. Delft University of Technology. Delft. 1997.*
- Tolman H.L. A Third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depth and current. - *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21, p. 782-791
- Zakharov V.E., Zaslavskii M.M., Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Polnikov V.G. Conceptually new wind-wave model. In: «The wind-driven air-sea interface electromagnetic and acoustic sensing, wave dynamics and turbulent fluxes», Sydney, Australia, 1999. P.159-164.

*Детальное исследование режима ветрового волнения для отдельных точек акватории Черного моря*

Информация о ветровом волнении крайне востребована при практических работах в морях и океанах. В зависимости от типа работ, необходимы те или иные режимно-климатические характеристики ветровых волн. Так при строительстве нефте и газодобывающих платформ, прежде всего, требуется информация об экстремальных волнах, возможных за время существования построенного сооружения. При прокладке морских трубопроводов нужны значения придонных волновых скоростей. При проектировании портов важно среднее количество простоев, т.е. сколько дней за навигацию порт не сможет работать по волновым условиям. Одной из наиболее востребованных характеристик при всех типах работ является изменчивость режима ветрового волнения.

*Внутригодовая изменчивость ветрового волнения.*

Оценка внутригодовой изменчивости ветрового волнения моря была произведена для пяти точек (рис.2). В целом они характеризуют пять районов моря: северо-западный, юго-западный, центральный, северо-восточный и юго-восточный.

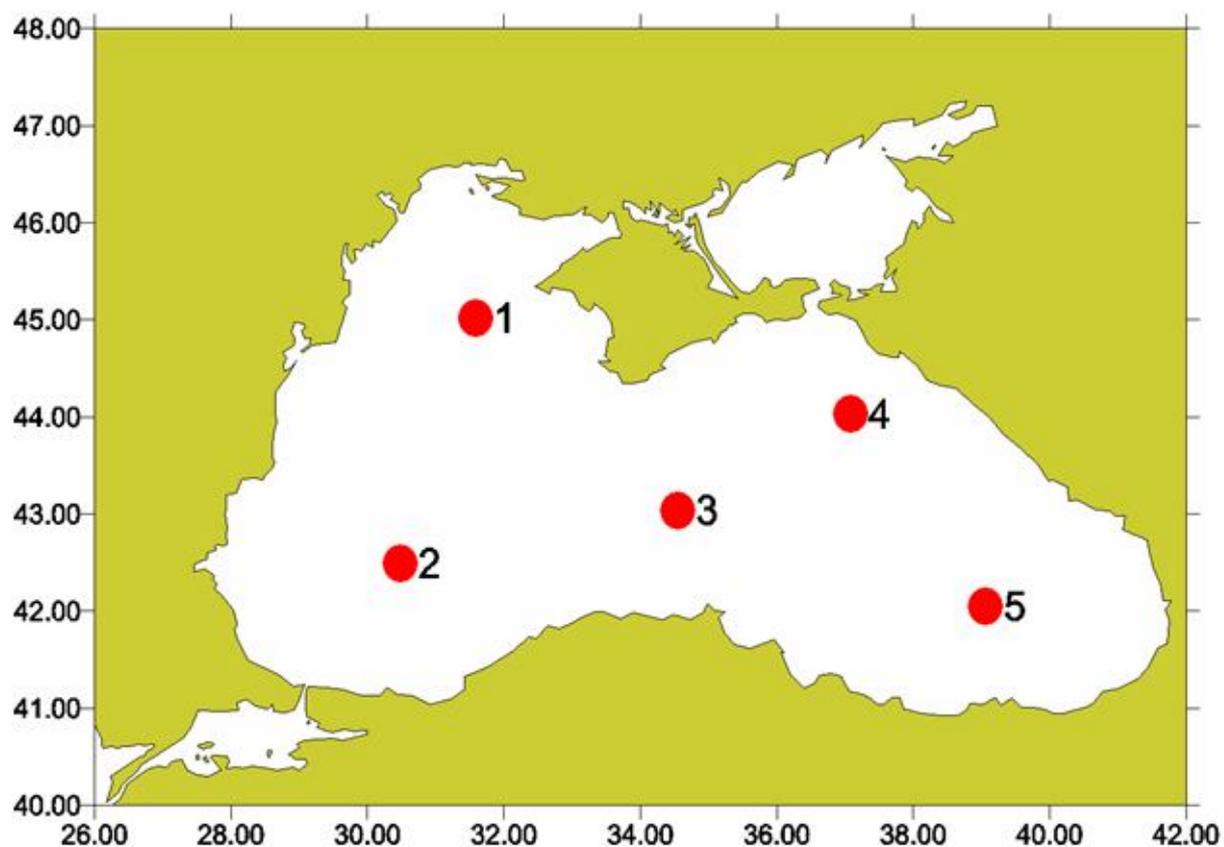


Рис.2 Карта Черноморо-Азовского бассейна с расположением точек, в которых рассчитывался климатические характеристики волнения.

Исходной информацией служили ряды средней высоты ветрового волнения за 2014 год с разрешением 1 час, которые представлены на рисунках 3-7. Данные ряды получены по Российской Атмосферной модели, описанные в первом разделе.

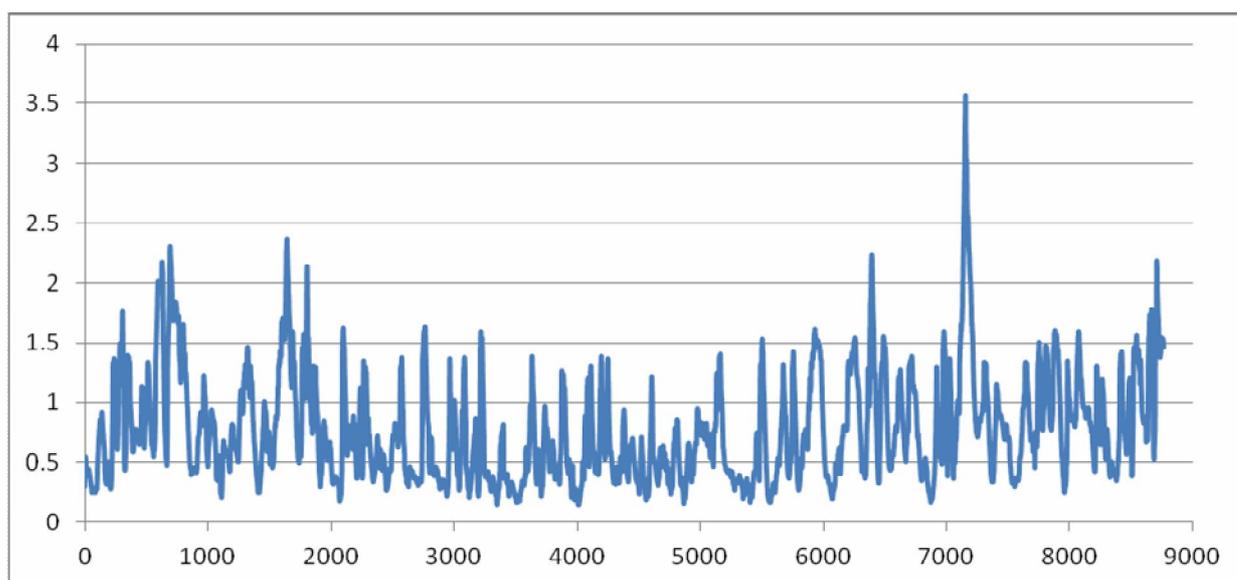


Рис.3 Средние высоты волн (м, ось ординат) за 2014 год. По шкале абсцисс отложено время в часах от начала года в точке 1.

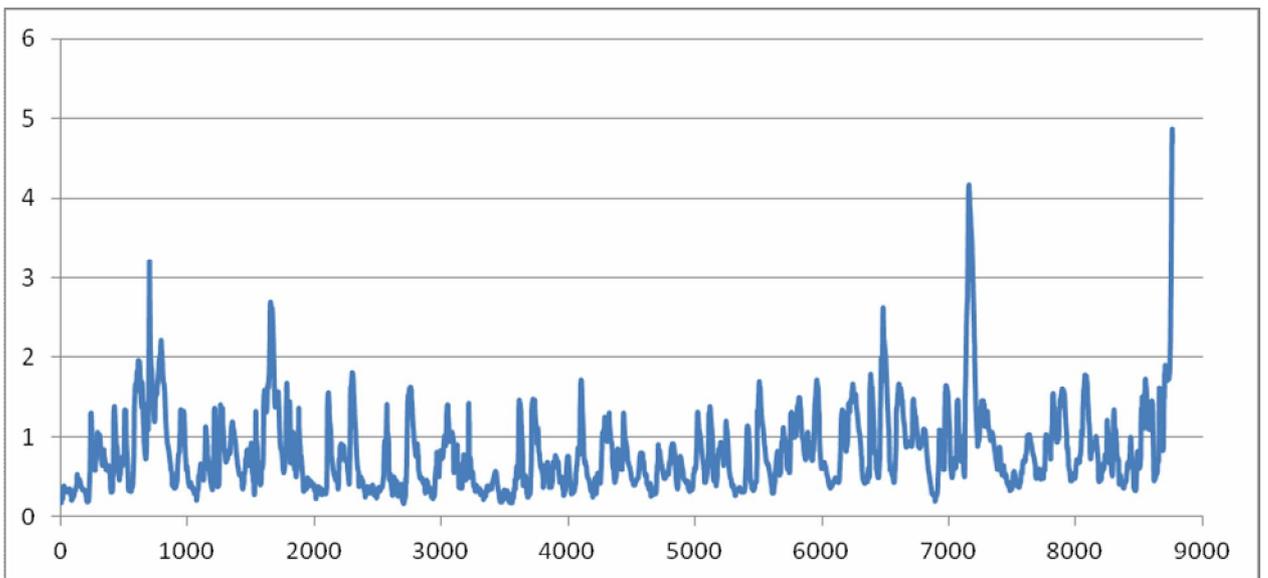


Рис.4 Средние высоты волн (м, ось ординат) за 2014 год. По шкале абсцисс отложено время в часах от начала года в точке 2.

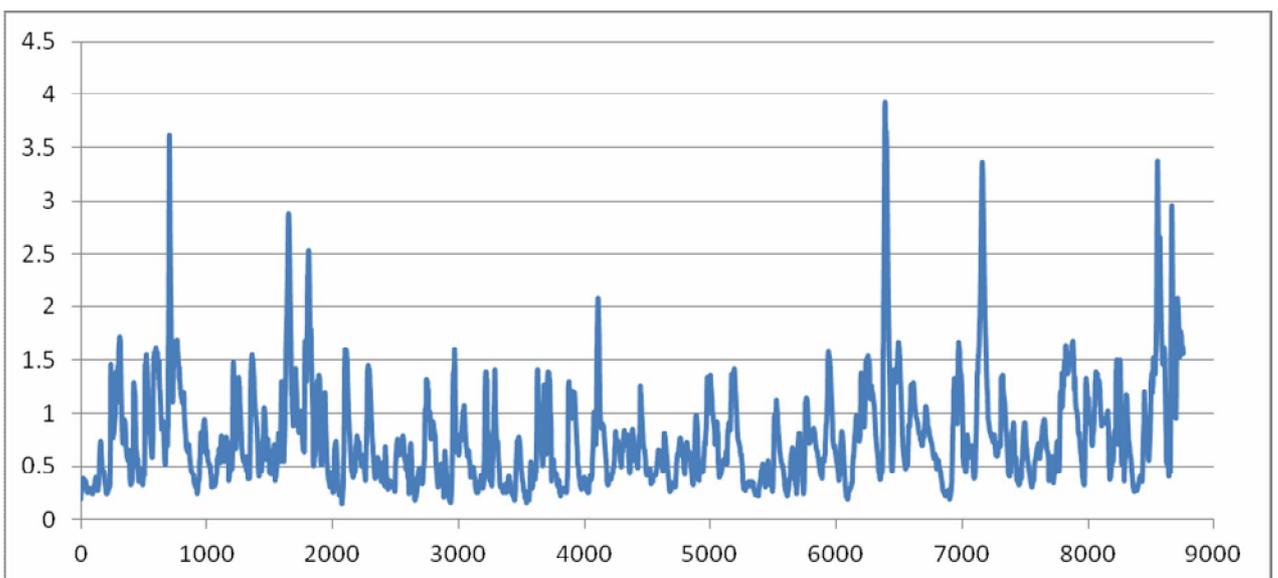


Рис.5 Средние высоты волн (м, ось ординат) за 2014 год. По шкале абсцисс отложено время в часах от начала года в точке 3.

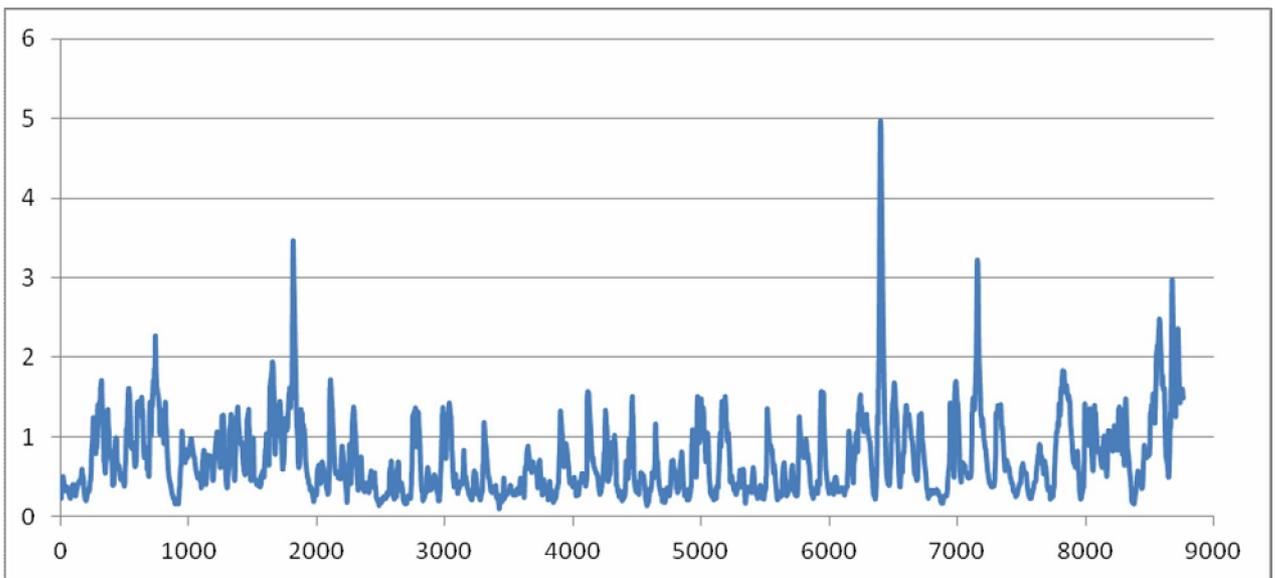


Рис.6 Средние высоты волн (м, ось ординат) за 2014 год. По шкале абсцисс отложено время в часах от начала года в точке 4.

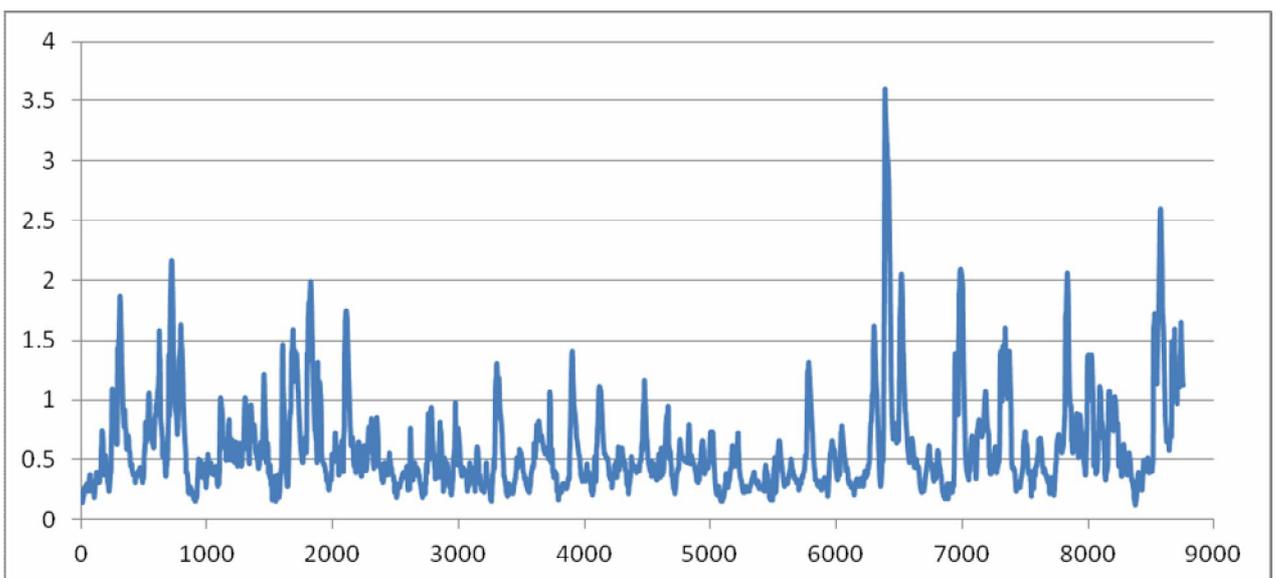


Рис.7 Средние высоты волн (м, ось ординат) за 2014 год. По шкале абсцисс отложено время в часах от начала года в точке 5.

Из анализа рисунков следует, что в целом на Черное море характеризуется относительно слабым волнением со средними высотами волн менее 2 м. При этом в хотя бы раз в год в любом из районов моря наблюдаются 4-5 метровые волны, которые являются для моря большими согласно климатически представлениям. Напомним, что при среднем 4-5 метровом волнении возможны индивидуальные высоты вол 12-15 м.

*Мощность (поток энергии) нерегулярного волнения.*

Новым и интенсивно развивающимся направлением деятельности в море является волноэнергетика. В настоящее время практически во всех развитых странах мира (в том числе и в России) разрабатывают преобразователи волновой энергии (ПВЭ). Основными режимно-климатическими характеристиками, которые необходимы для проектирования ПВЭ служат среднемесячные и среднегодовые значения мощности волновой энергии в акваториях предполагаемого размещения такой станции. При проектировании ПВЭ важнейшими факторами являются межсезонная и межгодовая изменчивости мощности волновой энергии [1]. Если эта изменчивость велика, то эксплуатация ПВЭ убыточна. В штормовые сезоны и годы будет наблюдаться переизбыток вырабатываемой энергии, а в «тихие» периоды времени электричество вырабатываться вообще не будет. Иными словами изменчивость ветрового волнения с практической точки зрения важна, прежде всего, для волноэнергетики. Поэтому, в последнее время при оценке изменчивости ветрового волнения все чаще используют термины, применяемые в волноэнергетике: среднемесячную и среднегодовую волновую мощность, приходящуюся на погонный метр волнового фронта. Например, в проекте EUROWAVES (A European Commission DGXII MAST 3 Project), где используются именно эти характеристики ветрового волнения.

На глубокой воде общая энергия волн  $E$  переносится с групповой скоростью  $c_{gr} = \frac{c}{2}$ , или (второй вариант) половина общей энергии - потенциальная - переносится с фазовой скоростью  $c$ . Физическая интерпретация этой величины приведена в [2]. В соответствии с ней, второй вариант более корректен. Таким образом, можно записать:

$$E = \frac{P}{c_{gr}} = \frac{2P}{c} \quad (9)$$

где  $P$  – мощность (поток) ветрового волнения, Вт/м. В исследованиях энергетики волн обычно находят поток  $P$ . Физический смысл  $E$  заключается в том, что это удельная энергия волн в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади океана.

Поток волновой энергии в системе нерегулярного волнения, обладающего направленным спектром  $F(\omega, \theta)$  равен

$$P_{ww}^{(1)}(\theta_0) = \rho g \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} F(\omega, \theta) c_{gr}(\omega) d\omega d\theta =$$

$$\rho g \int_0^{\infty} F(\omega) c_{gr}(\omega) d\omega = \frac{\rho g^2}{2} \int_0^{\infty} \frac{F(\omega)}{\omega} d\omega = \frac{\rho g^2}{2} m_{-1} \quad (10)$$

Подстрочный индекс  $\theta_0$  обозначает генеральное направление распространения волн. Поток волновой энергии соответствует то же направление. Аналогичная формула верна

для выделенного румба  $\theta_0$ . Тогда величина  $P(\theta_0) = \frac{\rho g^2}{2} m_{-1}(\theta_0)$ , и поток волновой энергии имеет направление  $\theta_0$ . Физический смысл мощности (потока волновой энергии)  $P$  (В/м) заключается в волновой энергии, проходящей через 1 метр взволнованной поверхности в единицу времени.

На рисунках 8-12 приведены среднемесячные волновые мощности в разных районах моря. Эти мощности рассчитаны отдельно за 1979-2013 годы и за 2014 год.

В северо-западном районе (рис.8) по данным за много лет выделяются два сезона: холодный, который длится с ноября по март и теплый, к которому относятся месяцы с мая по сентябрь. В холодный период времени среднемесячная мощность ветрового волнения примерно в 3-4 раза выше, чем в теплый. Апрель и октябрь относятся к промежуточным месяцам, среднемесячная мощность в них примерно равна среднегодовой. В 2014 году среднемесячные значения примерно соответствовали климатическим за исключением октября, который выдался «штормовым». Мощность в 2 раза превышала климатическую.

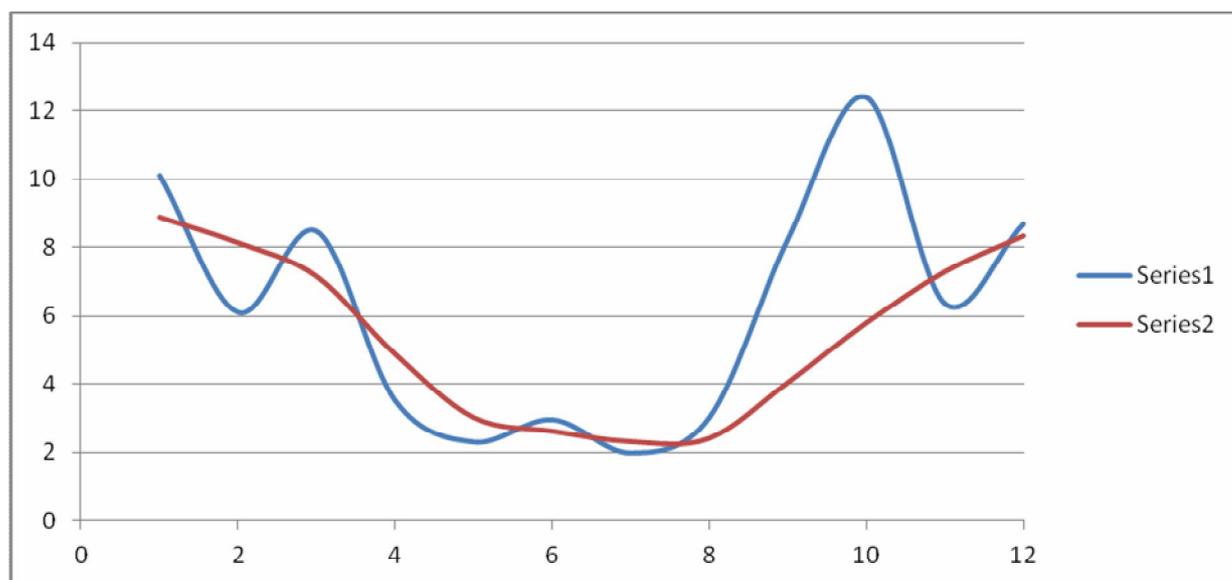


Рис.8 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в точке 1 по данным за 1979-2013 гг. (ряд 2) и за 2014 год (ряд 1).

В юго-западном районе (рис.9) характер климатической внутригодовой изменчивости в целом подобен наблюдаемому в северо-западном районе. Существенным отличием является то, что в холодный сезон среднегодовая мощность в этом районе в полтора раза выше, чем в северо-западном. При этом в теплый сезон среднемесячная мощность практически неотличима от северо-западного района и составляет около 3 кВ/м. В 2014 год заметно отличался от климатической нормы «бурной» осенью, пик среднемесячной мощности пришелся на октябрь.

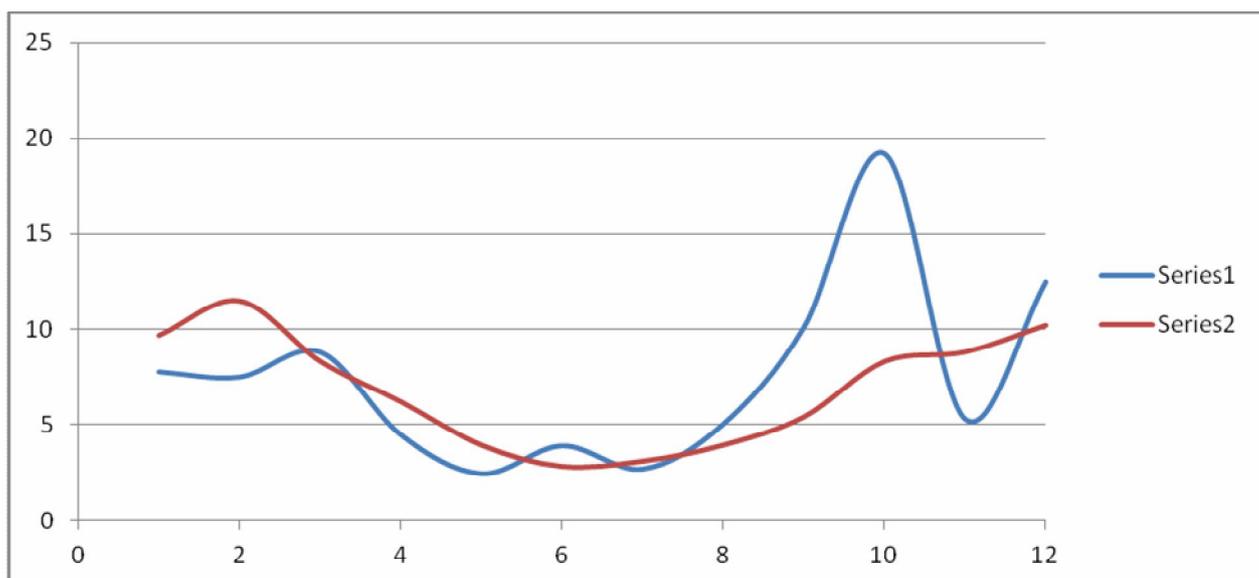


Рис.9 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в точке 2 по данным за 1979-2013 гг. (ряд 2) и за 2014 год (ряд 1).

В центральном районе (рис. 10) климатические значения мощности волновой энергии в целом соответствуют величинам, наблюдающимся в юго-западном районе. В 2014 год заметно отличался от климатической нормы «бурной» осенью, пик среднемесячной мощности пришелся на сентябрь.

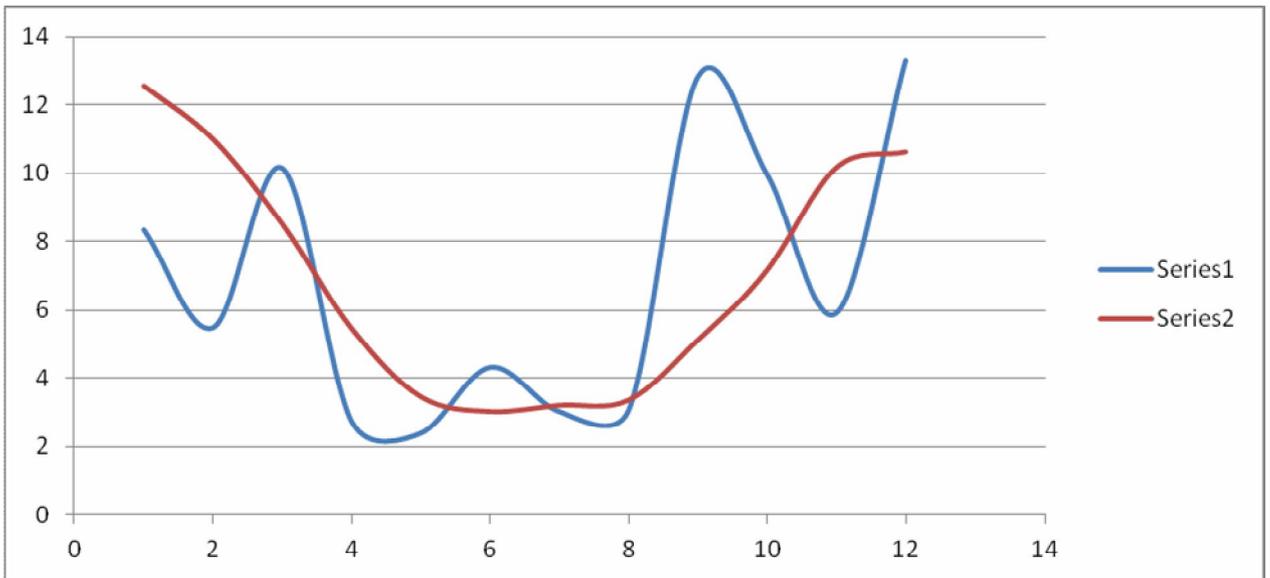


Рис.10 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в точке 3 по данным за 1979-2013 гг. (ряд 2) и за 2014 год (ряд 1).

В северо-восточном районе (рис. 11) наблюдается схожий с северо-западным характер климатической внутригодовой изменчивости ветрового волнения. В среднем в холодное время года мощность ветрового волнения составляет около 10 кВ/м в теплый – 2 - 3 кВ/м. В 2014 год заметно отличался от климатической нормы «бурной» осенью, пик среднемесячной мощности пришелся на сентябрь.

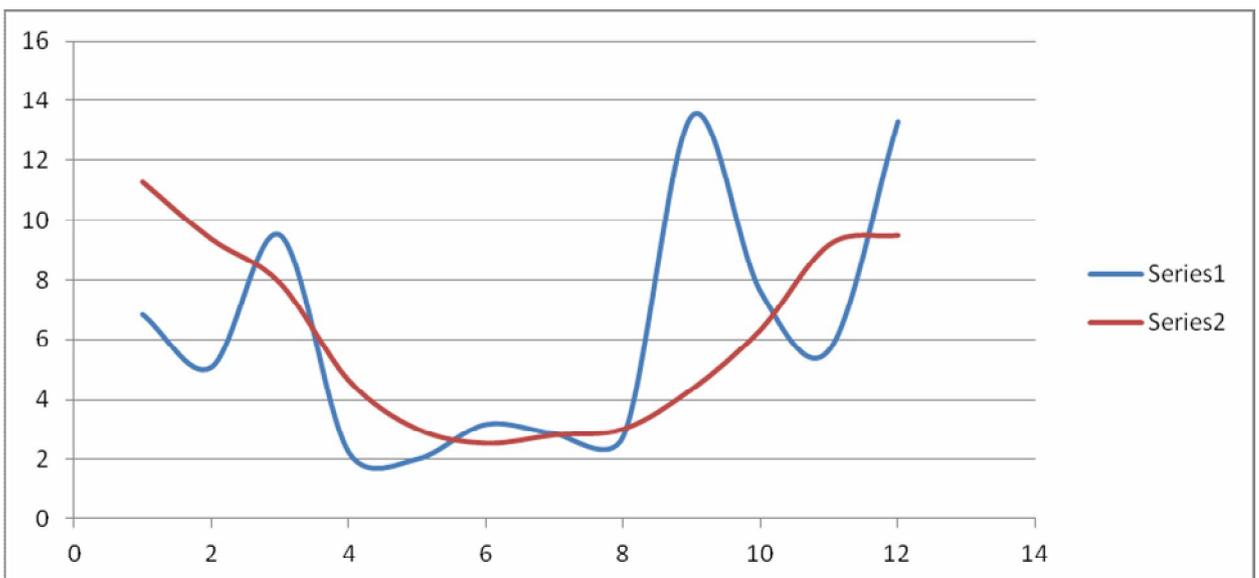


Рис.11 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в точке 4 по

данным за 1979-2013 гг. (ряд 2) и за 2014 год (ряд 1).

В юго-восточном районе (рис. 12) в холодное время года среднемесячная мощность по климатическим данным составляет около 8 кВ/м, в теплое время – около 2 кВ/м. В 2014 год заметно отличался от климатической нормы «бурной» осенью, пик среднемесячной мощности пришелся на сентябрь.

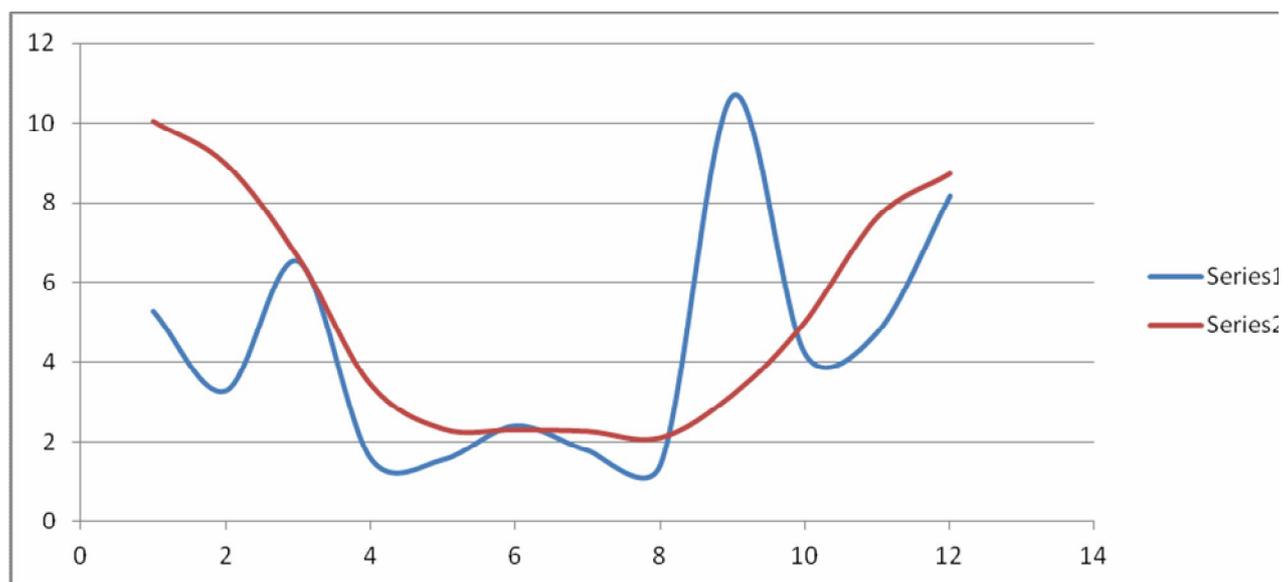


Рис.12 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в точке 5 по данным за 1979-2013 гг. (ряд 2) и за 2014 год (ряд 1).

В целом зима, весна и лето 2014 года соответствовали климатической норме. «Бурной» выдалась осень, при этом пик среднемесячной мощности пришелся на западе моря на октябрь, а на востоке и в центре на сентябрь.

Для сравнения на рис. 13 приведен годовой ход среднемесячной мощности ветрового волнения в Эгейском море, полученный в рамках проекта EUROWAVES [3]. Наблюдается общее подобие этого хода с наблюдаемым на юге Черного моря. Различие заключается в относительной штормовитости летних месяцев в Эгейском море. Она вызвана этезией (греч. *etesíai*), северными ветрами в восточной части Средиземного моря, преобладающими с апреля по октябрь. Возникновение этезии обусловлено образованием термической депрессии над сильно нагретой Западной Азией.

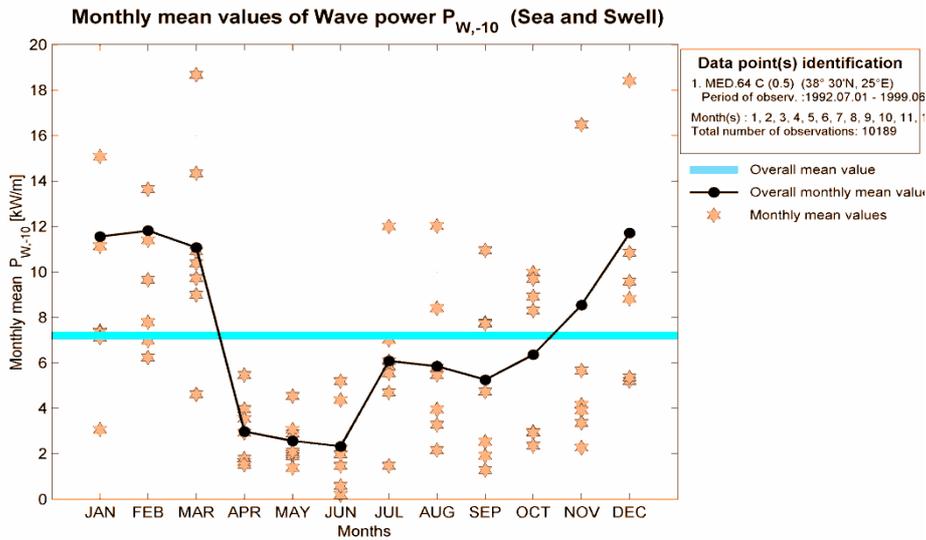


Рис.13 Среднемесячные значения мощности (кВ/м) ветрового волнения в Эгейском море по данным за 1992-1999 гг., полученные по данным проекта EUROWAVES

*Межгодовая изменчивость ветрового волнения.*

При исследовании межгодовой изменчивости ветрового волнения Черного моря анализировалась среднегодовая мощность ветрового волнения. Данная характеристика рассчитывалась за каждый год с 1979 по 2014. Ход этой характеристики приведен для разных точек на рисунках 14-18. Также приведен тренд, рассчитанный по (11)

$$P = a + bt, \quad \text{где } a = \frac{[P][t^2] - [Pt][t]}{N[t^2] - ([t])^2}, \quad b = \frac{N[Pt] - [P][t]}{N[t^2] - ([t])^2}, \quad (11)$$

где квадратная скобка обозначает суммирование  $\sum_{i=1}^N \dots$ , N –число лет (в данном случае 35).

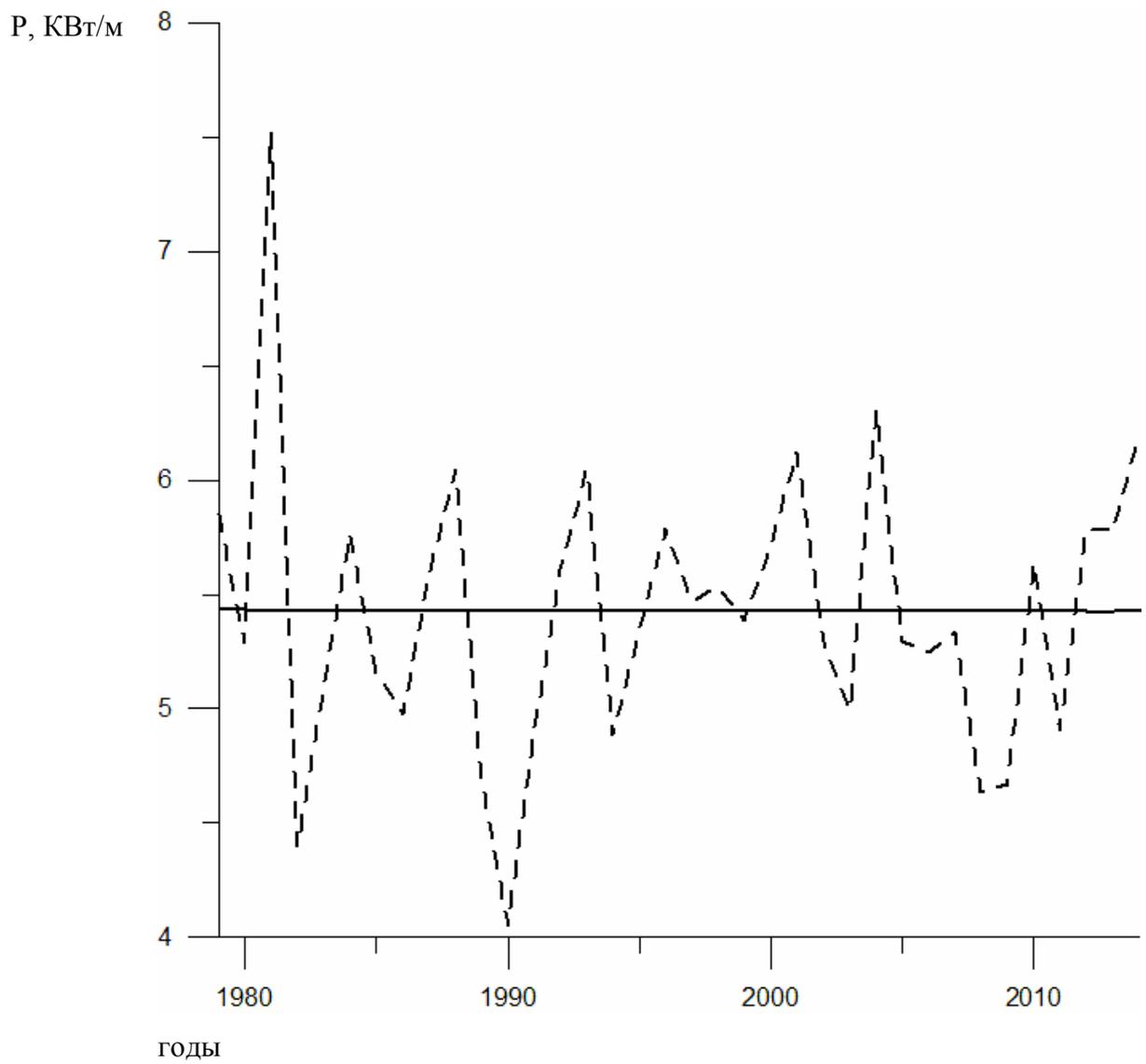


Рис.14 Среднегодовая мощность ветрового волнения (P, пунктирная линия) за 1979-2014 гг. и тренд этой характеристики (сплошная линия), точка №1

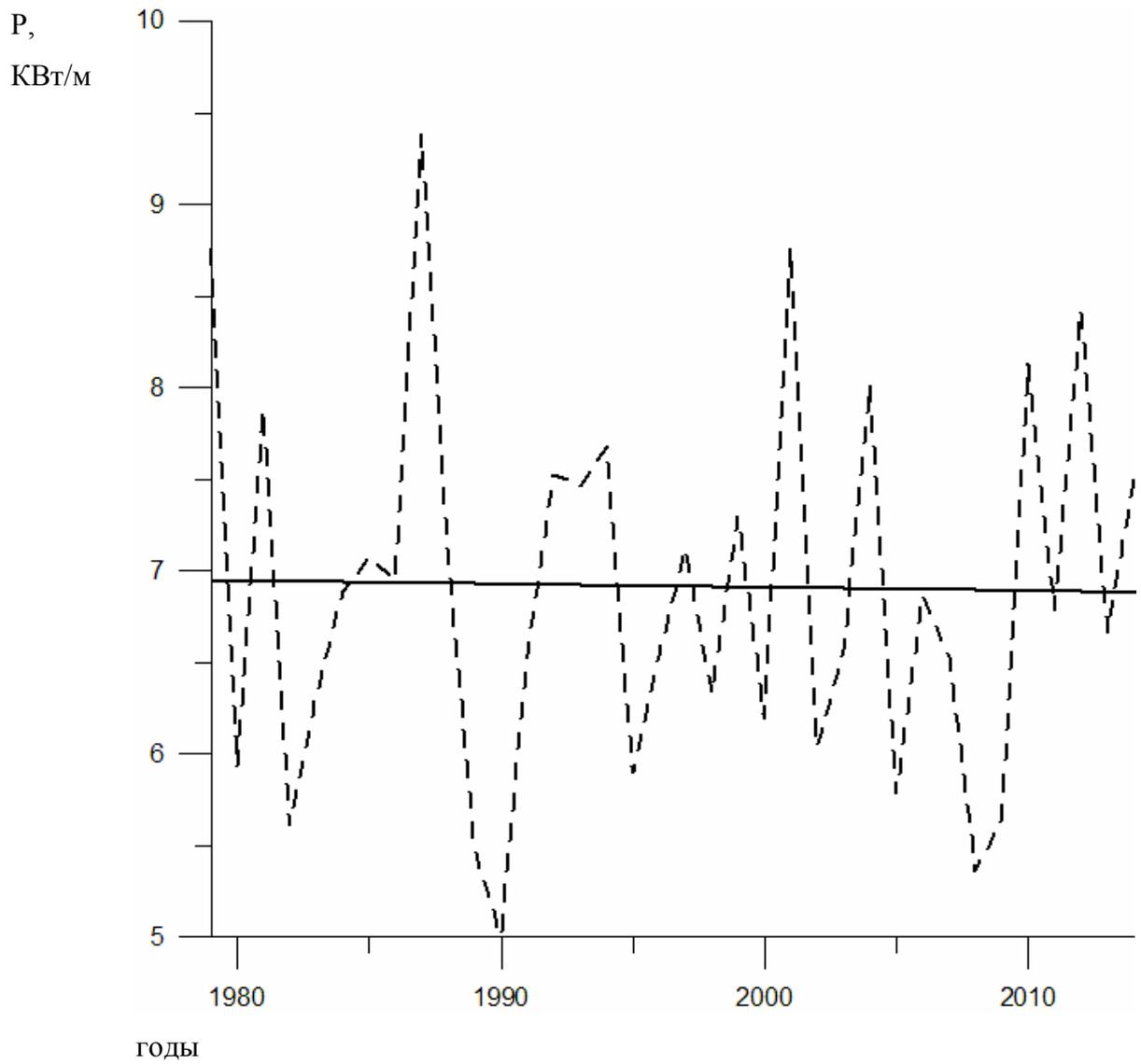


Рис. 15 Среднегодовая мощность ветрового волнения ( $P$ , пунктирная линия) за 1979-2014 гг. и тренд этой характеристики (сплошная линия), точка №2

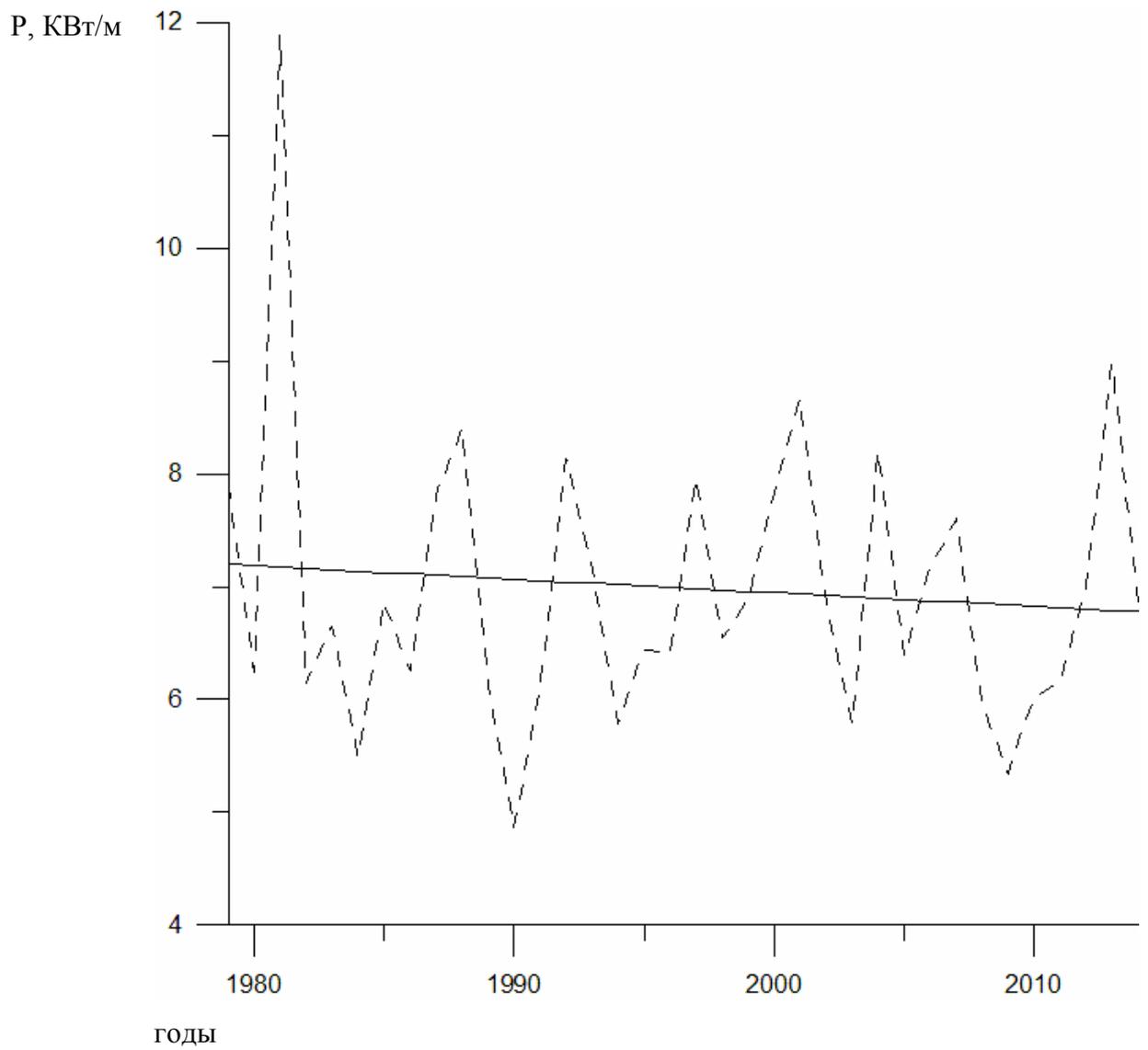


Рис. 16 Среднегодовая мощность ветрового волнения (P, пунктирная линия) за 1979-2014 гг. и тренд этой характеристики (сплошная линия), точка №3

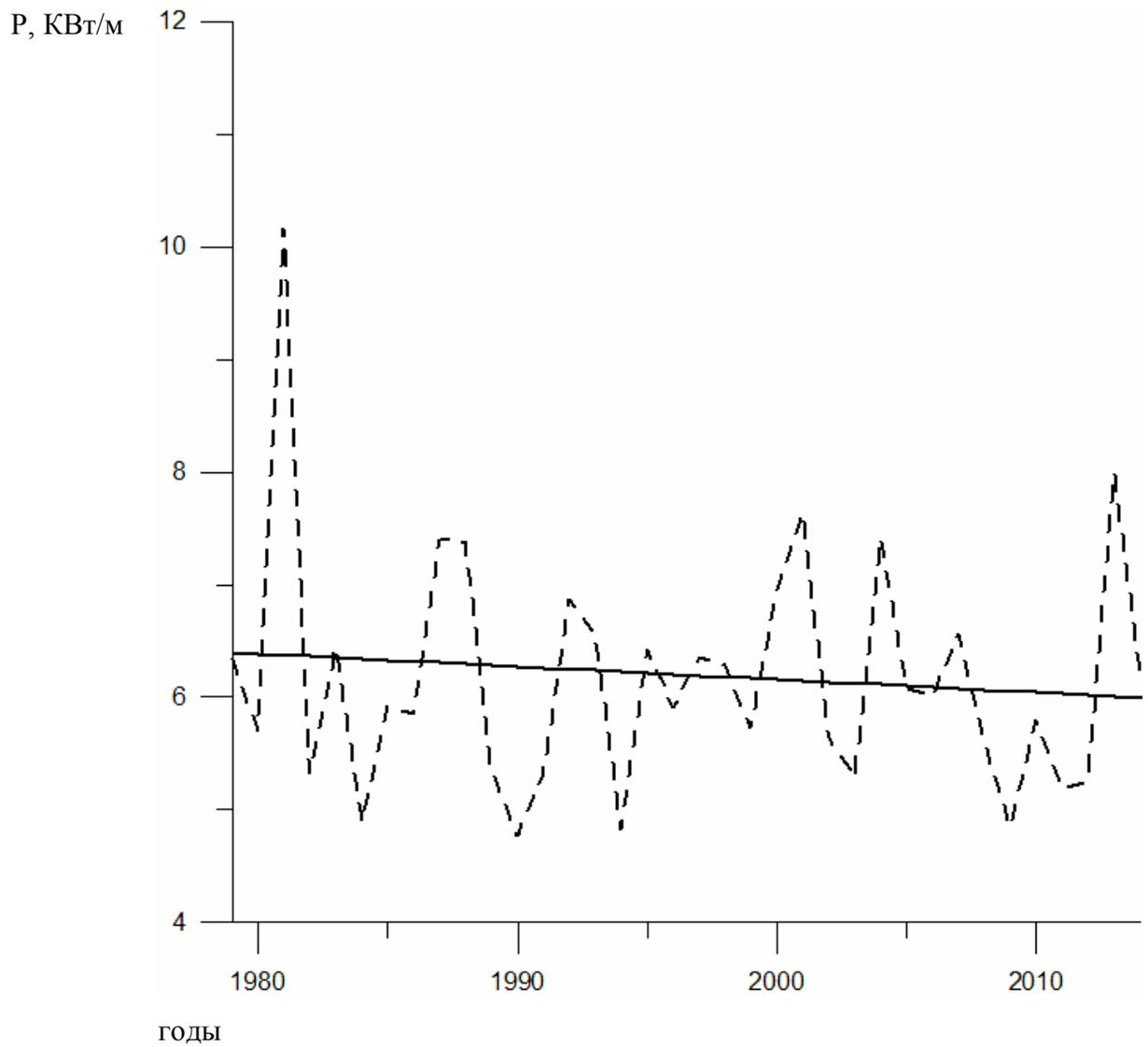


Рис. 17 Среднегодовая мощность ветрового волнения ( $P$ , пунктирная линия) за 1979-2014 гг. и тренд этой характеристики (сплошная линия), точка №4

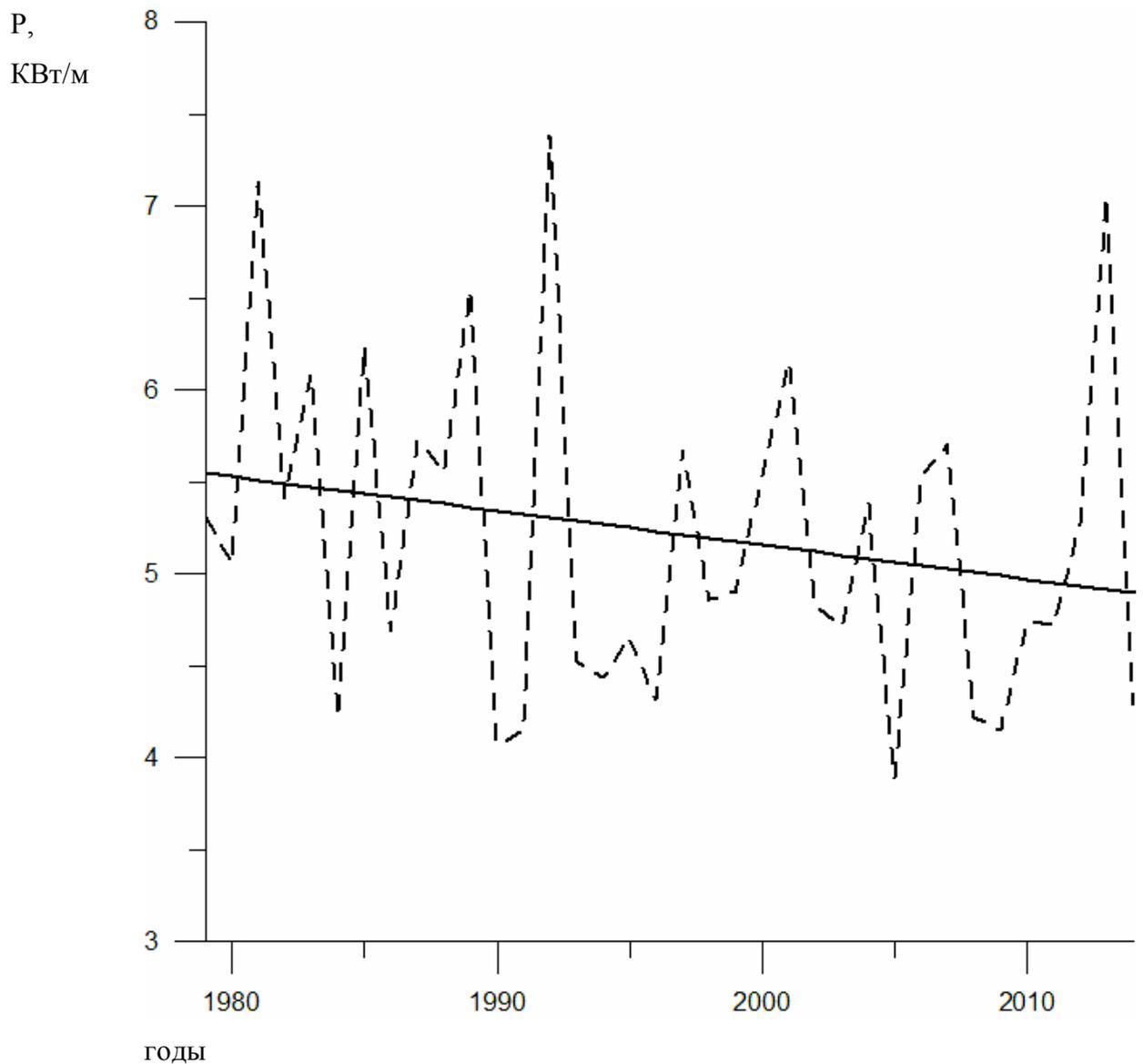


Рис.18 Среднегодовая мощность ветрового волнения (P, пунктирная линия) за 1979-2014 гг. и тренд этой характеристики (сплошная линия), точка №5

Для всех точек Черного моря наблюдался понижательный характер среднегодовой мощности (см. таблицу). Но если для точек на западе моря он имеет чисто номинальный характер, то для центральной и восточных точек превышает 10 ватт в год, достигая своего максимума на юго-востоке (-18 в/год).

Таблица

Числовые значения тренда для разных точек Черного моря

Номер точки	Значение тренда В/год
1	-0.2
2	-1.8
3	-11.5
4	-11.1
5	-18

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 2

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY IMPLEMENTING AGREEMENT FOR A CO\_OPERATIVE PROGRAMME ON OCEAN ENERGY SYSTEMS – ANNEX II – Development of recommended practices for testing and evaluating ocean energy systems Subtask II.2 Testing Procedures Draft, February 2002. Kim Nielsen, RAMBOLL, Denmark

Lacombe H. Cours d’oceanographie physique. Paris, 1965

<http://www.oceanor.no/projects/eurowaves/>

Кабатченко И.М. Исследование режима штормовых ветров и волн на примере Черного моря. – Автореферат диссертации на соискание уч.ст. канд.геогр. наук. М. 1985. 18 с.

Кудрявцева Г.Ф., Кабатченко И.М. Ветер. – Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, Черное море, т. 4, Гидрометеиздат, Л., 1986.

Раскин Л.Г. Кабатченко И.М. Ветровое волнение. - Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, том 4, Черное море, выпуск 1. Л., Гидрометеиздат, 1991, с. 354-367

Справочник по климату Черного моря. – М. Гидрометеиздат, 1974, 406 с.

Статистические характеристики изменчивости уровня Азовского моря.  
Обзор фоновых и экстремальных режимных характеристик уровня моря  
за последние 40 лет.  
(Ю.Г.Филиппов)

Наблюдения за уровнем в Азовском море начались в середине восемнадцатого века, однако проводились по рейкам, нерегулярно и данные почти не сохранились. Первые систематические наблюдения проводились с 1880 по 1883 г в Таганроге. С 1912 г начались наблюдения в Приморско-Ахтарске, но во время гражданской войны все было либо повреждено, либо уничтожено. Станции, по измерениям на которых можно было судить об уровне моря в целом, стали работать с 1923 г

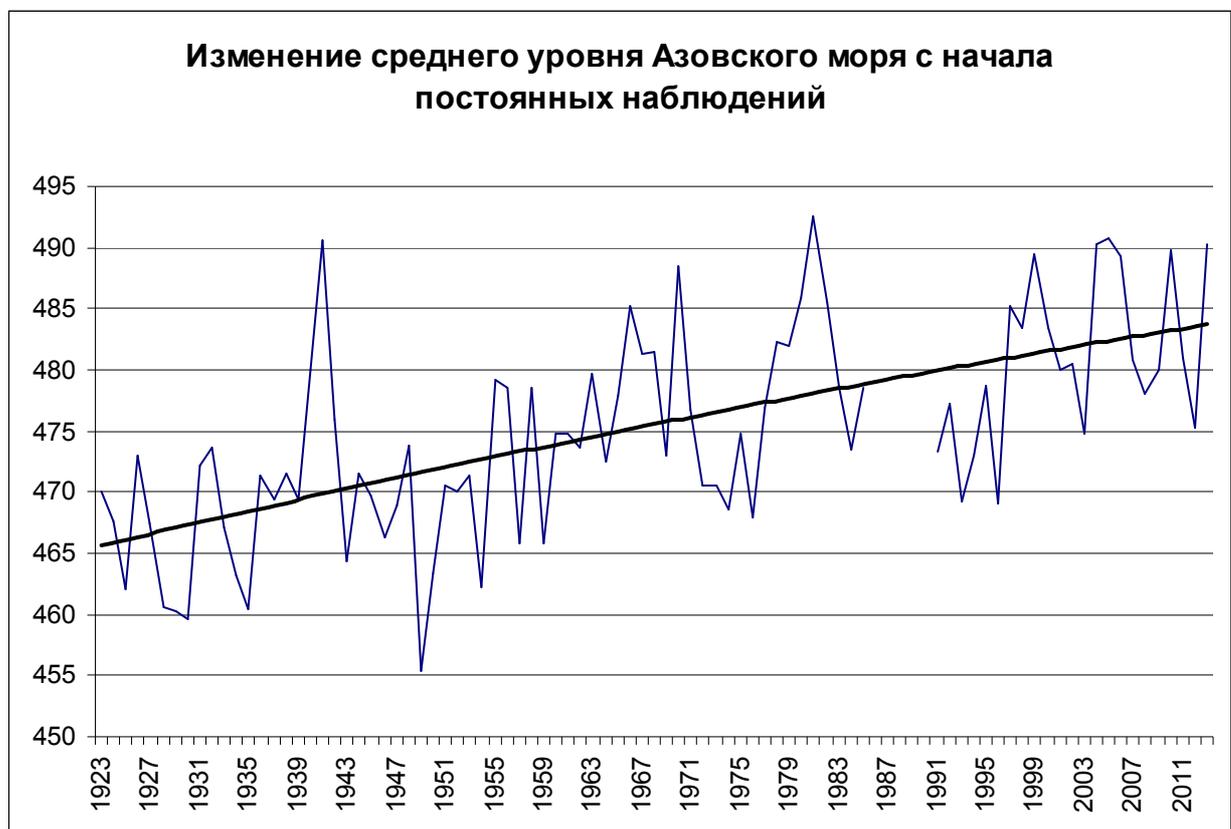


Рис 1 Изменение среднегодового уровня Азовского моря за весь период постоянных наблюдений [1], [2]. По вертикальной оси здесь отложены среднегодовые уровни (см) в системе ГВО СССР.

До 1985 г при построении этого графика использовались данные наблюдений в основных прибрежных пунктах Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Бердянск и Геническ. С 1986 г по 1991 г полноценных наблюдений за уровнем Азовского моря не

поступало. Начиная с 1991 г расчеты проводились без данных наблюдений в Бердянске и Геническе.

Из рисунка (1) видно, что в целом за 90 лет уровень растет. Скорость его роста составила в среднем для указанного периода около 0.20 см/г. Эти результаты находят подтверждение из других источников. Так, уровень мирового океана, по данным опубликованного доклада администрации президента США о состоянии климата в 2012 г, за последние 100 лет поднялся примерно на 20,3 см, т.е. уровень поднимался в среднем со скоростью 2,03 мм/г.

В работе [3] было рассмотрено изменение уровня в 20 пунктах Черного моря с 1874 по 1991 гг. Получено, что, начиная с 20-годов прошлого века интенсивность подъема уровня оценивалась величиной  $1,83 \pm 0.007$  мм в год, что, по мнению автора, находится в хорошем соответствии с соответствующей интенсивностью роста уровня Северной Атлантики.

Однако в последние годы при более подробном рассмотрении такая тенденция несколько усложняется. Это видно из следующего рисунка.

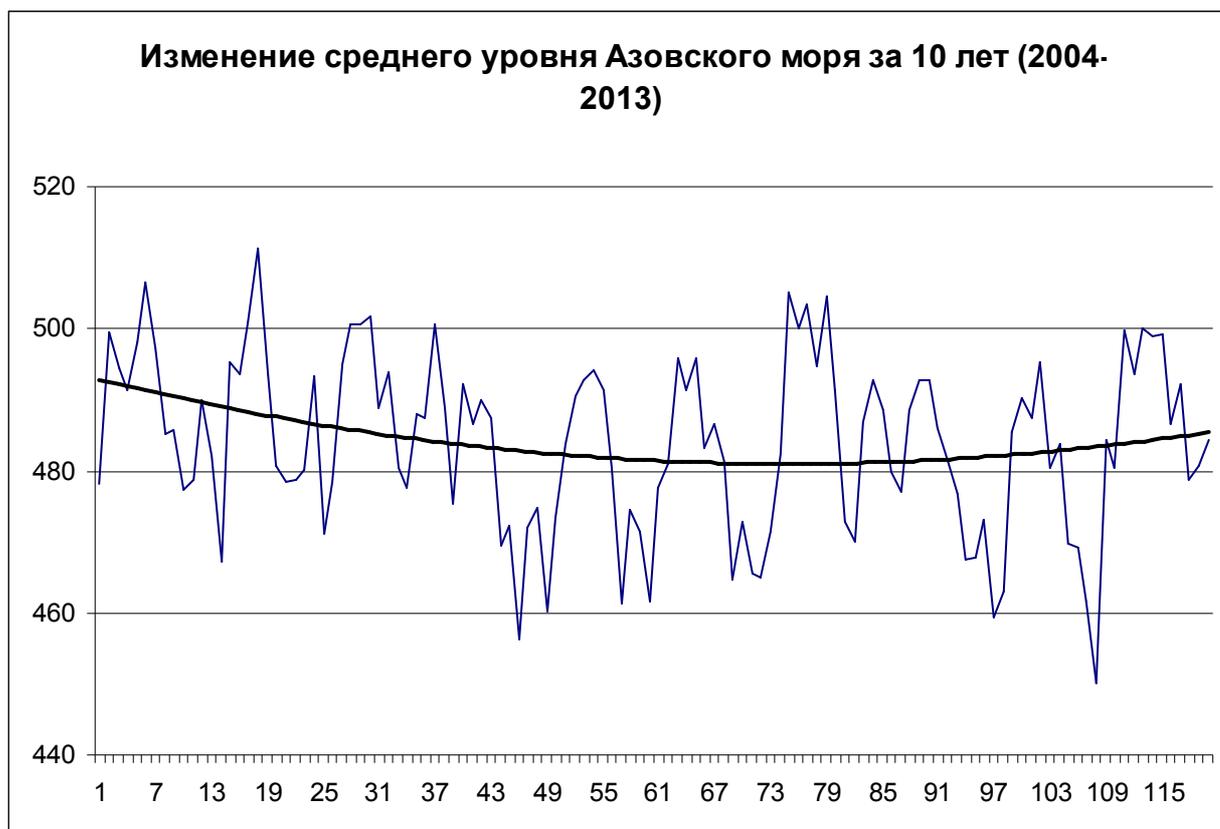


Рис.2 Изменение уровня Азовского моря с 2004 г по среднемесячным данным. Здесь по горизонтальной оси отложены месяцы с января 2004 г. по декабрь 2013 г.

Стандартное отклонение среднегодовых значений от средней линии роста уровня за весь 90-летний период составило 8,8 лет, за 40 и 10 последних лет одинаково - 6,3 года.

В течение последних 40 лет можно отметить увеличение среднемесячных уровней в теплое время года (май-август), уменьшение в сентябре, некоторое повышение в октябре и уменьшение в декабре – январе. Сезонные колебания уровня составляют в среднем 12 см, максимальные -25 см.

На рисунке 3 представлены графики изменения по пространству моря с запада на восток среднемесячных уровней, рассчитанных по данным за 10 лет (2004-2013) в пунктах Темрюк, Приморско-Ахтарск, Ейск и Таганрог. Эти пункты соответствуют цифрам, отложенным по оси абсцисс в том же порядке. Например, в июне средний за десять лет уровень в Таганроге составил 500 (ГВО), в Ейске 493. В сентябре в Таганроге он составляет 471, в Ейске 467. Для получения приближенного расчетного уровня в системе ГВО нужно сложить рассчитанный прогнозируемый уровень с этими данными для каждого месяца. Номер месяца показан в правой части рисунка.

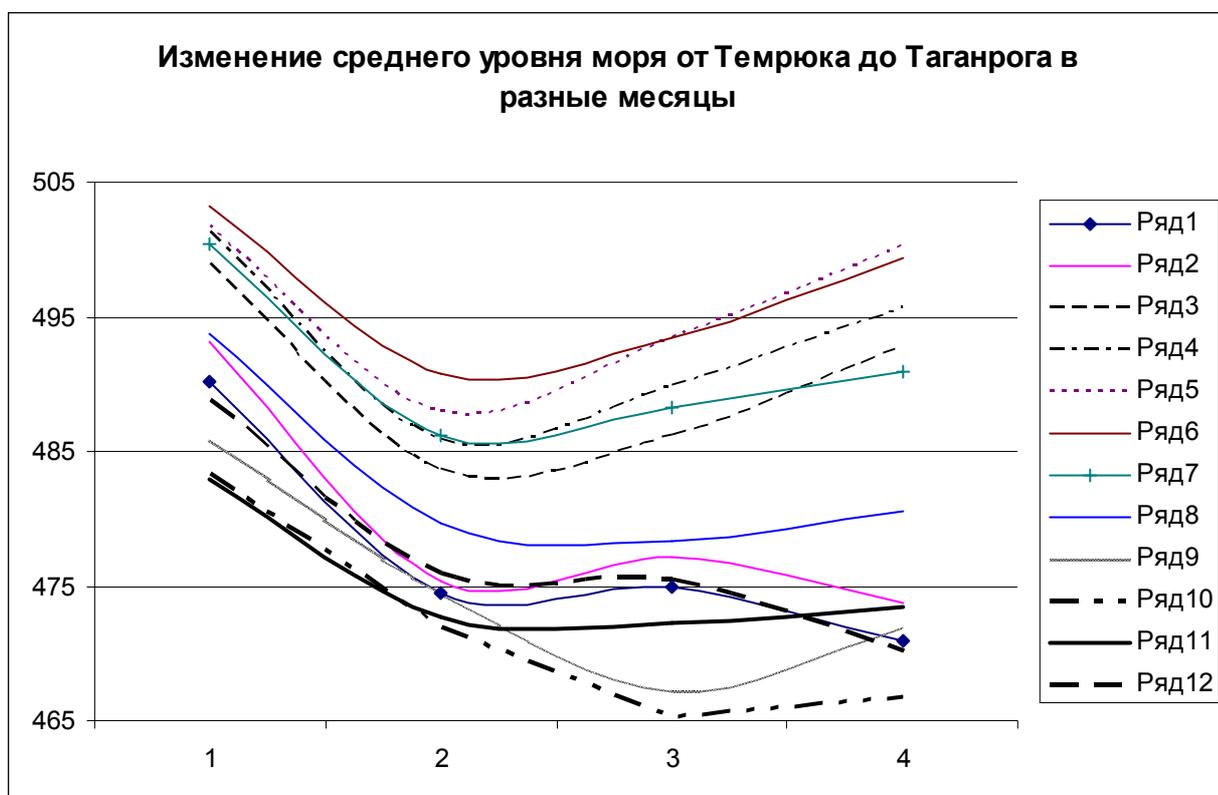


Рис 3 Профиль среднемесячного уровня восточной части Азовского моря по месяцам

Превышение критических отметок уровня при нагонах и уменьшение уровня ниже критических отметок при сгонах в течение года наблюдается во всех пунктах. Наибольшее число превышений уровня над критическим значением отмечается в Темрюке. Так, в 2010 г такие случаи наблюдались здесь 47 раз.

Самыми штормовыми месяцами являются январь (в среднем 4-5 штормов в год), октябрь и ноябрь (по 2 шторма) и декабрь (3 шторма), остальные – по одному. Ниже на рисунках показано изменение уровня в наиболее заметных штормах последних лет.



Рис 4. Изменение уровня моря в Таганроге во время западного шторма 24 марта 2013 г. По оси ординат указан уровень в см ГВО, по оси абсцисс – часы.

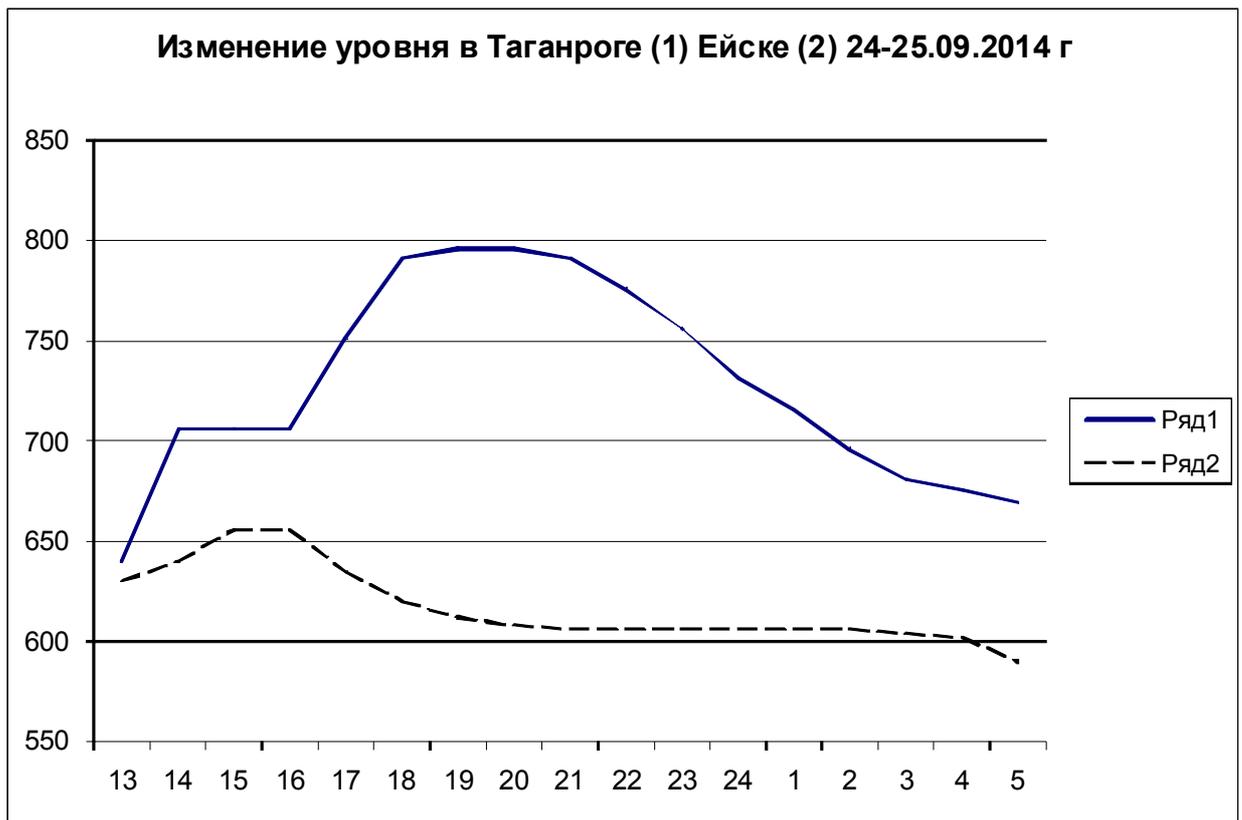


Рис 5. Изменение уровня моря в Таганроге и Ейске во время шторма 24-25 сентября 2014 г.

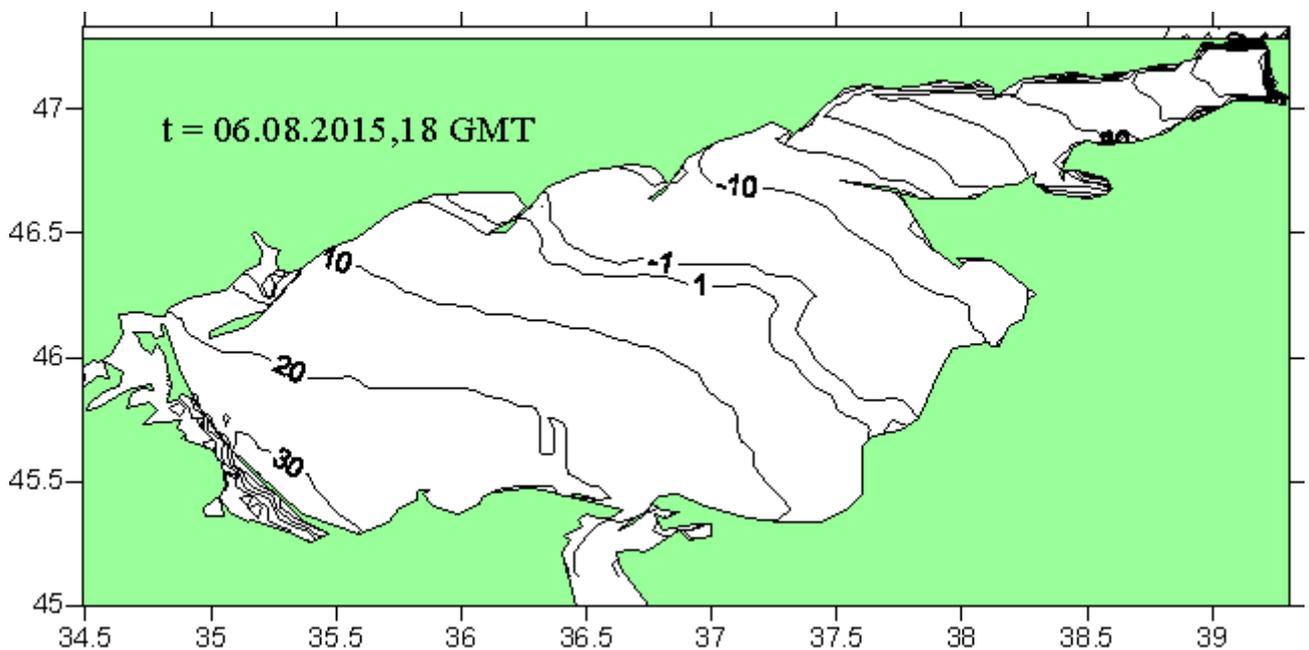


Рис.6 Пример распределения уровня по акватории моря во время северо-восточного шторма в августе 2015 г, расчеты выполнены по методике [4].

На следующих рисунках (Рис.7 и Рис.8) приводятся примеры длительных наблюдений и расчетов уровня в двух пунктах восточной части моря. Здесь данные представлены в отклонениях от среднего уровня моря. По горизонтальной оси указаны часы.

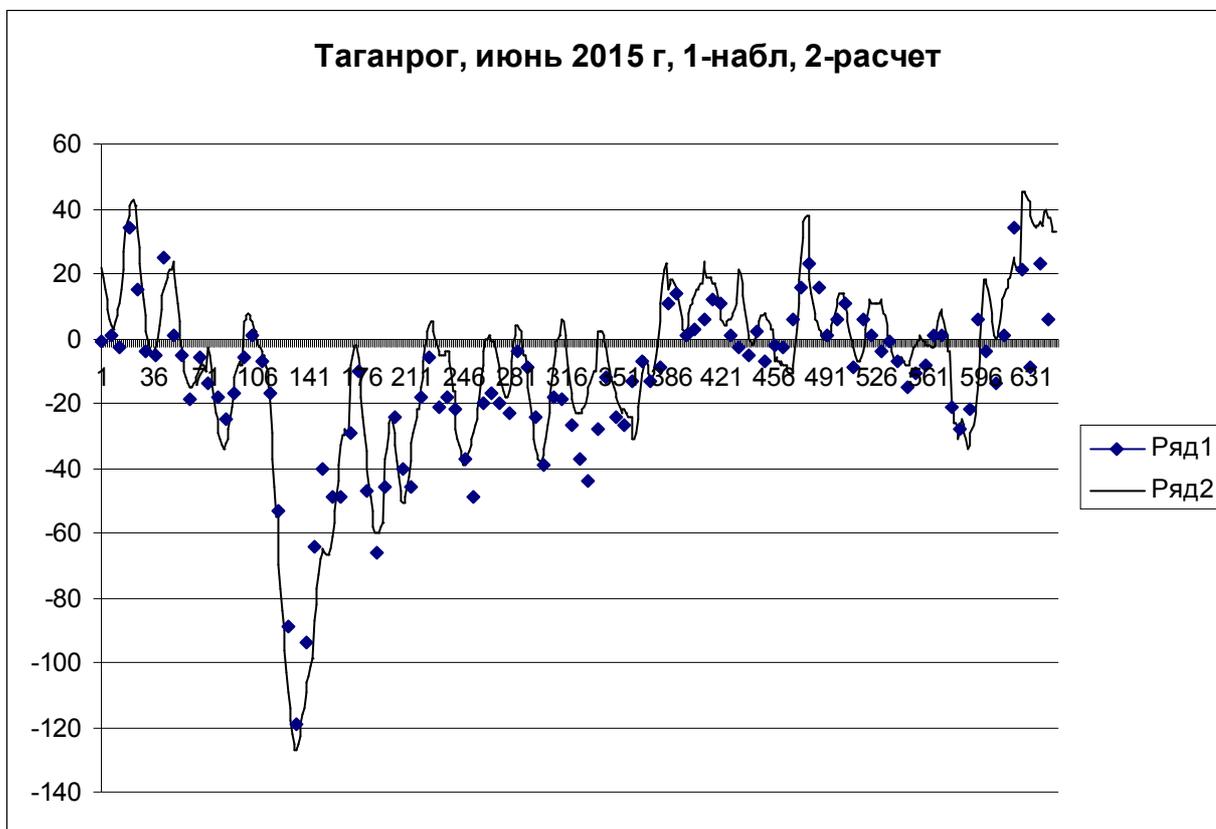


Рис 7 Изменение уровня в Таганроге, наблюдения и расчет (прогноз на сутки).

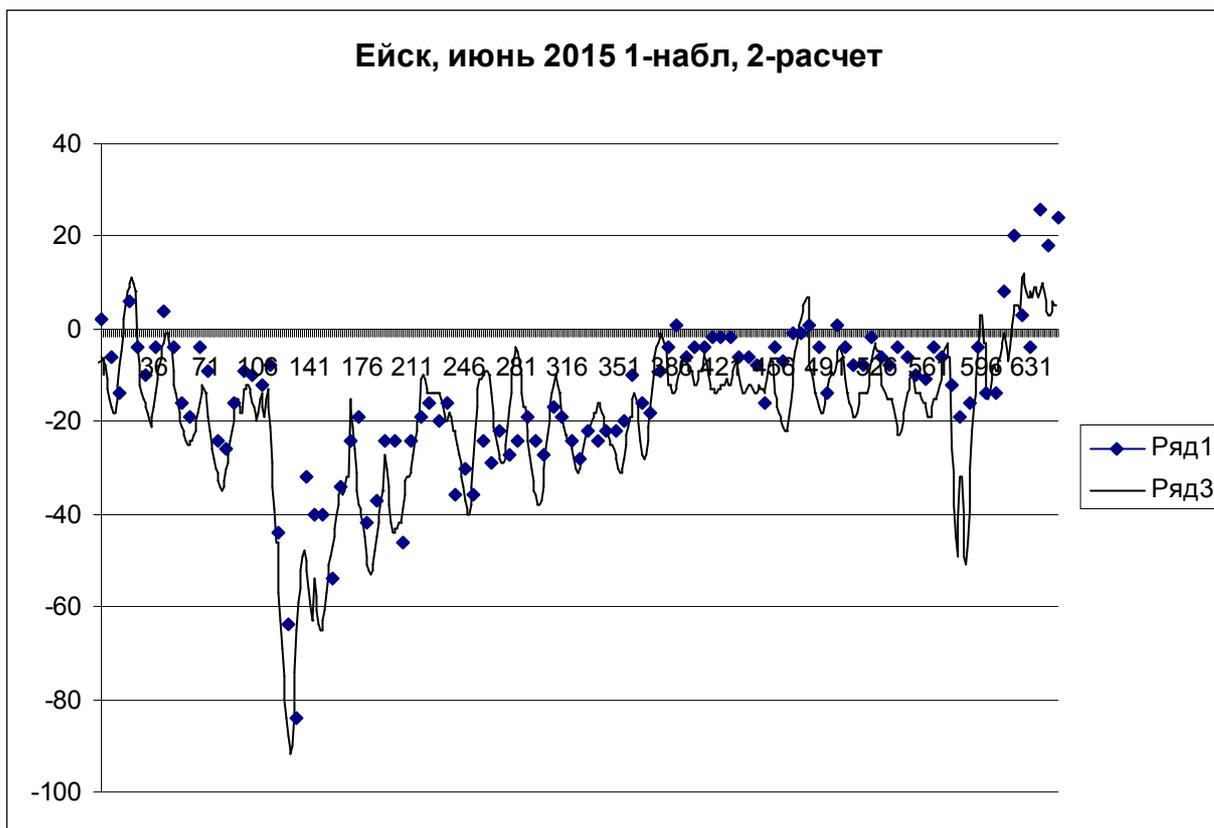


Рис. 8 Изменение уровня в июне 2015 г в Ейске.

Ниже приводятся некоторые статистические характеристики современной изменчивости уровня в пункте Таганрог для двух месяцев - июня и сентября 2015 г.

Июнь: среднее квадратическое отклонение наблюдаемого уровня от среднего 24,69 см,  
 среднее абсолютное отклонение расчетов от наблюдений 12,0 см,  
 среднее квадратическое отклонение расчетов от наблюдений 16,03 см,  
 отношение третьего к первому 0,64

Сентябрь: среднее квадратическое отклонение наблюдений от среднего уровня моря 33,1 см,

среднее абсолютное отклонение расчетов от наблюдений 11,0 см,  
 среднее квадратическое отклонение расчетов от наблюдений 15,06 см,  
 отношение третьего к первому 0,45

### ЛИТЕРАТУРА К РАЗДЕЛУ 3

1. Каталог наблюдений за уровнем Черного и Азовского морей. ГОИН, Севастопольское отделение, Севастополь, 1990, 266 с.

2. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и устьев рек. Государственный водный кадастр. Часть 1. Моря, 1991 -2013.
3. Рева Ю.А. Межгодовые колебания уровня Черного моря//Океанология, 1997,т.37,N.2, с. 211-219.
- Ю.Г. Филиппов О влиянии стока р.Дон на уровень воды в Таганрогском заливе.// Метеорология и гидрология, 2015, N2, с. 76-80.